

DOI: 10.18721/JEST.27307

УДК 620.178.53:621.313

*А.И. Таджикибаев¹, Х. Драганчев², В.С. Яровой³,
Л. Гаюров⁴, Л.М. Коркин⁴*

¹ ФГАОУ ДПО Петербургский энергетический институт повышения квалификации,
Санкт-Петербург, Россия;

² Технический университет г. Варна,
г. Варна, Болгария;

³ Акционерное общество «Теккноу»,
Санкт-Петербург, Россия;

⁴ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВИБРАЦИОННОГО АНАЛИЗА

В работе дано описание результатов исследований в рамках создания системы управления производственными активами на примере определения ресурсных показателей подшипников качения электродвигателей. При исследовании разработаны математические модели для прогнозирования технического состояния подшипников. В моделях учтены факторы вторичного воздействия на примере дефектов сопряжения муфт, провоцирующих наибольшее число отказов подшипниковых узлов. Решена задача выбора периодичности контроля заключающаяся в соблюдении требования, чтобы подшипник не достиг предельного технического состояния к моменту очередного контроля. Рассмотрено два метода назначения периодичности по скорости развития повреждения. Обоснованы уравнения, учитывающие этапы приработки, нормальную эксплуатацию и повышенный износ при предельных сроках эксплуатации. Разработанная методика прогнозирования технического состояния позволяет организовать эксплуатацию на базе систем управления техническим состоянием. Внедрение систем обеспечивает минимизацию аварийности подшипниковых узлов и повышение надежности электродвигателей.

Ключевые слова: подшипники качения, электродвигатель, периодичность контроля, износ, прогнозирование технического состояния.

Ссылка при цитировании:

Таджибаев А.И., Драганчев Х., Яровой В.С., Гаюров Л., Коркин Л.М. Прогнозирование технического состояния подшипников качения на основе вибрационного анализа // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 3. С. 77–85. DOI: 10.18721/JEST.27307

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*A.I. Tadzhibaev¹, H. Draganchev², V.S. Yarovoy³,
L. Gayurov⁴, L.M. Korkin⁴*

¹ Federal State educational establishment PEIPK,
St. Petersburg, Russia;

² Technical University of Varna,
Varna, Bulgaria;

³ Tek-know, St. Petersburg, Russia;

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

FORECASTING OF THE TECHNICAL CONDITION OF ROLLING BEARINGS BASED ON VIBRATION ANALYSIS

The paper describes the results of research in the framework of creating a production asset management system by the example of determining the resource indicators of rolling bearings of electric motors. Mathematical models to predict the technical condition of rolling bearings in the frame of the research have been developed. The possibilities to take into account the factors of secondary impact on the bearing assembly showed on the example of coupling defects. The problem of choosing the frequency of control is solved, which consists in meeting the requirement that the bearing does not reach the maximum technical condition by the time of the next control. Two methods of assigning periodicity according to the rate of damage development are considered. The equations that take into account the stages of running-in, normal operation and increased wear at the maximum operating time are justified. The developed method of forecasting the technical condition allows to organize operation on the basis of technical condition management systems. The implementation of such systems ensures the minimization of the accident rate of bearing units and the increase of the reliability of electric motors.

Keywords: rolling bearings, electric motor, frequency of monitoring, wear and tear, forecasting of the technical condition.

Citation:

A.I. Tadzhibaev, H. Draganchev, V.S. Yarovoy, L. Gayurov, L.M. Korin, Forecasting of the technical condition of rolling bearings based on vibration analysis, Materials Science. Power Engineering, 27 (03) (2021) 77–85, DOI: 10.18721/JEST.27307

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. *Постановка задачи.* Техническое состояние подшипников во многом определяют надёжность, безопасность и эффективность эксплуатации электродвигателей. Исследования показывают, что в ряде случаев отказы из-за их неисправности достигает (20-25) % от общего числа отказов электродвигателей [1, 2], что подчёркивает актуальность задач оценки технического состояния подшипниковых узлов. Дефекты конструктивных элементов ПК выявляются на следующих частотах [2–4]:

$$f_{\text{нар}} = k \frac{z}{2} n \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right),$$

$$f_{\text{вн}} = k \frac{z}{2} n \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right),$$

$$f_{\text{тк}} = k \frac{d}{2D} n \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \beta \right),$$

$$f_c = k \frac{n}{2} \left[1 - (d \cos \beta) / D \right],$$

$$f_{\text{п}} = kn,$$

где: $f_{\text{нар}}$, $f_{\text{вн}}$, $f_{\text{тк}}$, f_c , $f_{\text{п}}$ – частоты, возникающие в подшипнике в повреждениях соответственно в наружном кольце, внутреннем кольце, в теле качения, сепараторе, при перекосе подшипника; $k = 1, 2, 3$, соответственно при перекосе подшипника, при износе наружного кольца, при трещинах

и раковинах на наружном кольце; n – частота вращения; D – диаметр окружности проходящей через центр тел качения; z – число тел качения; d – диаметр тел качения; β – угол контакта; при перекосе подшипника $k = 0,5$; 2. При всей очевидности подходов к идентификации дефектов есть ряд задач, решение которых требуют дополнительных исследований и анализа: приведение в соответствие описания технических состояний подшипников и их идентификацию в соответствии с современными нормативными документами с целью обоснования методик оценки ресурсных свойств, разработка методик прогнозирования технического состояния с целью обоснования интервалов между диагностическими обследованиями.

Введённые новые нормативные документы требуют соответствующей корректировки в понимании физики процессов разрушения и их увязки с категориями технического состояния. По динамике изменения технического состояния целесообразно выделить двух характерных процессов. Проведение работ со строгим исполнением требований нормативной и технологической документации на всех этапах цикла жизни ПК меняет техническое состояние на этапе эксплуатации с прогнозируемым износом и сроком службы. Однако в большинстве процесс изменения технического состояния при ошибочных действиях персонала, при воздействии сверхнормативных эксплуатационных факторов приводит к преждевременному отказу, что требует дополнительных исследований процессов разрушения. Например, часто возникающей причиной преждевременного разрушения ПК является образование задиров на телах и дорожках качения. Проведение исследований в том числе экспериментальных показали, что причинами этого являются смещение и излом осей сопрягаемых валов, ухудшение качества смазки, возникновение между рабочими поверхностями качения абразивных частичек в результате увеличения нагрузки сверх расчётного значения. Знание причин позволяет обосновать техническое воздействие: устранить смещение и излом валов, допущенных при монтаже и наладке или возникших в процессе эксплуатации; изменить состав и систему смазки; пересмотреть проект в части приведения в соответствие типа подшипника и нагрузки, заменить подшипник в установке. По существу приведённые данные демонстрируют увязку между собой вида технического воздействия на ПК с физическими процессами изменения и уровнем технического состояния.

В зависимости от величины индекса технического состояния в соответствии с методикой, утверждённой Приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 26.07.2017 №6765¹ и опираясь на измеренный уровень среднего квадратического значения (СКЗ) (фон вибрации) и усреднённую амплитуду ударных импульсов (УИ) выделить следующие категории технического состояния.

Первая категория при индексе от 85 до 100 (вид технического состояния «Очень хорошее») характеризуется незначительным превышением УИ над СКЗ и имеют уровень значительно ниже нормируемых значений аварийного предела (начальная стадия зарождения дефектов в ПК). Состояние не требует экстренного технического воздействия и может ограничиться диагностированием в плановом порядке.

Вторая категория при индексе от 70 до 85 (вид технического состояния «Хорошее»), когда увеличивается амплитуда ударных импульсов, развивая уже зародившиеся дефекты, уровень фона в силу локальности развития дефекта увеличивается незначительно, ещё нет условий для расширения зон разрушения. Предусматривается техническое воздействие, обоснованное плановым диагностированием, например, измерение параметров смазки при очередном обслуживании.

При индексе, находящемся в диапазоне от 50 до 70 (вид технического состояния «Удовлетворительное»), *третья категория* характеризуется энергией импульсов и фона достаточных для более ускоренного развития уже зародившихся дефектов и расширением зон разрушения. При таком техническом состоянии требуется усиление контроля, например, более частое измерение

¹ Приказ Минэнерго № 676 от 26.07.2017 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

диагностических параметров, проведение дополнительных работ, например, балансировка в собственных осях.

Диапазон индекса технического состояния от 25 до 50, определённого в результате измерения параметров вибраций, является *четвёртой категорией* (вид технического состояния «Неудовлетворительное»). Состояние характеризуется стремительным расширением геометрических границ разрушения и ростом температуры за счёт преобразования механической энергии вращения во внутреннюю энергию конструктивных элементов подшипника. В этих условиях требуется усиленный даже по сравнению с третьей категорией технического состояния контроль, дополнительное техническое обслуживание и проведение ремонтных работ.

Пятая категория технического состояния с индексом меньше 25 (вид технического состояния «Критическое») характеризуется тем, что по существу сравнялись между собой измеренные уровни фона и пиков. Подшипник не способен исполнять свои функции и его разрушение может привести к разрушению установки в целом. Вид технического воздействия: вывод из эксплуатации, замена подшипника или подшипникового узла, проведение работ по реконструкции подшипникового узла.

Приведённое описание категорий технического состояния по существу является основой интерпретации результатов измерения диагностических параметров технического состояния ПК. Однако кроме текущего отнесения к одному из видов технического состояния есть не менее важная задача определения интервалов времени между измерениями. Выбор периодичности измерений при диагностических обследованиях производится, исходя из имеющейся информации о скоростях развития дефектов. Накопленный опыт диагностики показывает, что большинство дефектов ПК развивается достаточно медленно (интервалы между их обнаружением на первоначальном этапе развития и отказом могут составлять до 20-30% от ресурса) [2–4]. Но часть дефектов могут развиваться очень быстро и скачкообразно, причем интервалы между подобными событиями поддаются количественной оценке с высокой степенью неопределённости. В этих условиях задачу диагностики сводят не только к обнаружению имеющихся и установившихся по величине дефектов, но и к оценке прогноза изменения диагностического параметра, что в комплексе является важнейшим элементом создания системы управления техническим состоянием.

Выделяют следующие виды разрушения ПК: отрыв частичек металла с рабочих поверхностей, возникновение пластических деформаций тел качения и колец, абразивное изнашивание при возникновении между рабочими поверхностями частиц высокой твёрдости, разрушение в результате чрезмерных ударных нагрузок, разрушение из-за ухудшения условий смазки. Несмотря на достаточную изученность приведённых физических процессов их динамика зависит от большого числа факторов, возникающих на каждом этапе цикла жизни ПК. При разработке важно задание в конструктиве таких радиальных и осевых нагрузок, которые бы обеспечили базовую долговечность []. В зависимости от величины осевой составляющей она либо суммируется с внешней осевой силой, либо вычитается, создавая дополнительные усилия ускоряя или замедляя процессы разрушения. Усталостные дефекты подшипников формируются в местах касательного давления тел качения на места соприкосновения с внутренними и наружными кольцами и определяется максимальным касательным напряжением сдвига

$$\tau_{\max} = k_{\tau} \sigma_{\max} / 2,$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение в плоскости контактной площадки; k_{τ} – коэффициент геометрического соотношения размеров контактной площадки.

Важными составляющими, влияющими на динамику изменения технического состояния при проведении монтажных работ являются следующие факторы: наличие шероховатостей на посадочных поверхностях, градиент температур между подшипником и валом при тепловой сборке,

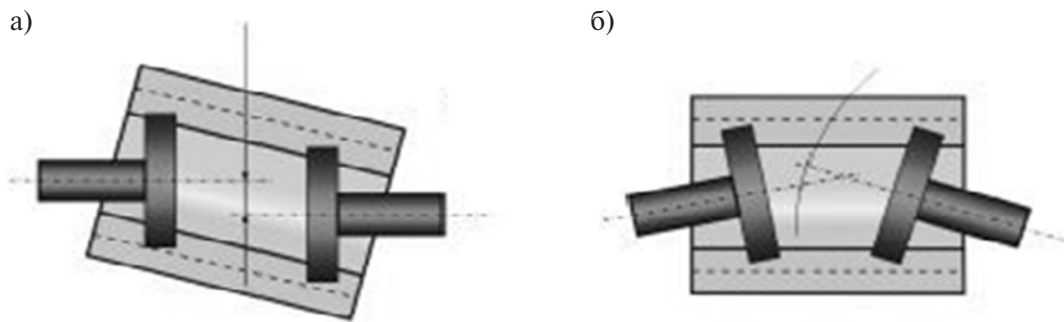


Рис. 1. Дефекты сопряжения муфт: а) смещение осей; б) излом оси
 Fig. 1. Coupling defects a) offset of the axes; b) axis break

смещение и излом осей муфт. Нарушение соосности соединяемых опор (рис. 1) приводит к противофазной вибрации подшипников. Следствием, как правило, является повышение вибрации двойной частоты, если подшипники установлены в одном корпусе. Повышение вибрации в подвижных муфтах вызывается следующими дефектами: несоосность шеек роторов и венцов полу-муфт; отсутствие контактов по пружинам и кулачкам; износ рабочих поверхностей; ухудшение смазки. В этих условиях прогнозирование технического состояния ПК усложняется элементами неопределенности анализа параметров муфт. Особое место в проявлении нестационарности сигнала занимает наличие зазоров в подшипнике и неплотная посадка, приводящие к смещению колец друг относительно друга. Временные сигналы и спектры таких дефектов имеют нестабильную фазу колебаний с вариациями в широких пределах от одного измерения к другому. Таким образом техническое состояние ПК определяется не только условиями эксплуатации, но и всеми этапами предшествующими вводу в эксплуатацию. Обеспечение надёжности, безопасности и эффективности на основе прогнозирования требует анализа предыстории с моделированием статистики и динамики технического состояния.

Прогнозирование по предыстории осуществляется на основе использования функций, максимально близко описывающих динамику развития дефекта. Краткосрочный прогноз может моделироваться линейными функциями вида

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 \tau$$

с адаптацией наклона подбором коэффициентов α_0 и α_1 в зависимости от характера изменения дефекта. Длительный прогноз реализуется моделированием ломаной прямой, либо показательной, экспоненциальной или комбинированной функциями.

Для более длительного прогноза для аппроксимации применяются показательные и экспоненциальные функции вида:

$$y = \tau^{\alpha_2} \quad \text{и} \quad y = e^{\alpha_3 \tau}.$$

Более универсальной для процесса износа является функция вида:

$$y = a_0 \tau^{\alpha_4} e^{\alpha_5 \tau}.$$

Уравнение охватывает все три процесса износа приработку, износ с постоянной скоростью (нормальную эксплуатацию) и повышенный износ, соответствующий развитию неисправности.

Для области нормального износа, аппроксимация параметров может быть осуществлена по линейной зависимости. Уровень вибрации возрастает незначительно.

Для оценки параметра α_i приближенной зависимостью, аппроксимирующей статистические данные, наиболее универсальным способом является метод наименьших квадратов. По методу наименьших квадратов α_i выбирают таким образом, чтобы квадратичная погрешность имела минимальное значение. Так для аппроксимации $y = \alpha_1 \tau$, $y = \tau^{\alpha_2}$ и $y = e^{\alpha_3 \tau}$, коэффициент « α » определяют соответственно по формуле:

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \tau y}{\sum_{i=1}^n \tau^2}; \quad \alpha_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \lg \tau \lg y}{\sum_{i=1}^n (\lg \tau)^2}; \quad \alpha_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \tau \lg y}{\lg e \sum_{i=1}^n \tau^2},$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – номер измерения; τ – время прогнозирования; $\alpha_i = y_{\text{пред}} / y_{0-i}$; y_0 – начальное значение измеряемого параметра.

При прогнозировании по известной скорости развития, характеризуемой скоростью изменения величины диагностического параметра, прогноз осуществляется по формуле:

$$\delta_{\text{пр}} = S_b \tau,$$

где $\delta_{\text{пр}}$ – прогнозируемое значение диагностического параметра; S_b – скорость изменения диагностического параметра; τ – время прогноза.

Метод используют для прогноза по единичному первоначальному замеру, когда имеется достаточная статистика по скорости изменения диагностического параметра. При прогнозировании необходимо учитывать будут ли на прогнозируемый период соблюдаться условия эксплуатации, какие имели место в предыстории. Если условия будут отличаться, то в прогноз необходимо внести поправки на влияние изменившихся условий.

Выбор периодичности контроля заключается в соблюдении требования, чтобы объект контроля не достиг предельного значения технического состояния за время между процедурами контроля.

Если выбирается постоянная скорость развития неисправности, то скорость принимается максимально возможной.

Период контроля определяется по формуле:

$$\tau_{\text{к}} = \frac{\delta_{\text{пр.в}} - \delta_{\text{зам}}}{S_{\text{макс}}},$$

где $\delta_{\text{пр.в}}$ – предельно возможный диагностический параметр; $\delta_{\text{зам}}$ – измеряемое значение диагностического параметра; $S_{\text{макс}}$ – максимально возможная скорость изменения диагностического параметра.

При переменном периоде контроля последующий период контроля выбирается проводя линию S (максимальной возможной скорости развития неисправности) до пересечения с линией, соответствующей значению предельно возможного контролируемого диагностического параметра. Точка пересечения определяет момент следующего контроля K_2 , и т. д. В этом случае переменный период контроля, исходя из максимально возможной скорости развития повреждения, уменьшается с наработкой:

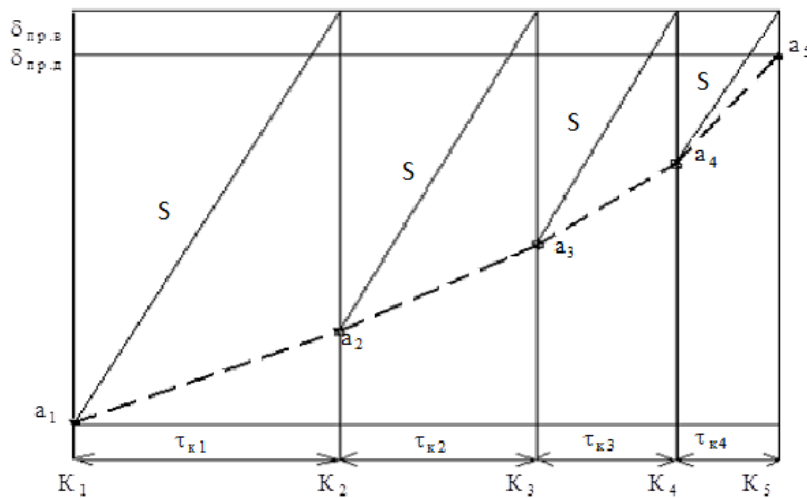


Рис. 2. К выбору периодов контроля:

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – значения фактических диагностических параметров в момент измерения

Fig. 2. To the choice of control periods:

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – the values of the actual diagnostic parameters at the time of measurement

$$\tau_{к1} > \tau_{к2} > \tau_{к3} > \tau_{к4}.$$

Однако нестационарность измеряемых сигналов. Особое место в проявлении нестационарности сигнала занимает наличие зазоров в подшипнике и неплотная посадка, приводящие к смещению колец друг относительно друга. Временные сигналы и спектры таких дефектов имеют нестабильную фазу колебаний с вариациями в широких пределах от одного измерения к другому. Таким образом техническое состояние ПК определяется не только условиями эксплуатации, но и всеми этапами предшествующими вводу в эксплуатацию.

Выводы

Таким образом, опираясь на актуальный нормативный документ², анализ физических процессов зарождения и развития дефектов обосновано описание категорий технического состояния ПК и технических воздействий. Проведенный анализ зависимости параметров ПК от эксплуатационных факторов в том числе вторичных (дефекты муфт) позволил обосновать методику прогнозирования технического состояния с целью определения интервалов периодического контроля и организации системы управления техническим состоянием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987.

[2] Вибрационный анализ / Е.С. Голуб и др. – СПб.: ПЭИПК, 2009. – 85 с. [Библиотека специалиста по ТДНК объектов энергетики, Серия 1. «Методические основы ТДНК», Выпуск 1.3 (4)].

[3] Влияние изменения скорости вращения вала роторного оборудования на обработку в частотной области. Ю.П. Асламов, А.П. Асламов, И.Г. Давыдов, А.В. Цурко. Доклады БГУИР, №3 (113), 2018.

² Приказ Минэнерго № 676 от 26.07.2017 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

- [4] Харкевич А.А. Спектры и анализ – М. : URSS, 2018.
- [5] Algorithms for refinement of the shaft rotational speed for solving the problems of vibration diagnostics of rotary equipment / Y. Aslamov [et al.] // WCCM. 2017. P. 15
- [6] Науменко А.П. Вероятностно-статистические методы принятия решений: теория, примеры, задачи / А.П. Науменко, И.С. Кудрявцева, А.И. Одинец; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: ОмГТУ, 2018.
- [7] Зацепин А.Ф. Акустический контроль / А.Ф. Зацепин; под ред. В.Е.Щербина. – Екатеринбург: Изд-во урал. ун-та, 2016. – 211 с.
- [8] Зорин В.А. Надежность механических систем: учебник / В.А. Зорин. – М.: ИНФРА-М, 2017.
- [9] Викторов В.С. Модели и методы расчёта надёжности технических систем. Изд. 2-е, испр. – М.: ЛЕНАНД, 2016.
- [10] Савостин А.А. Интеллектуальная диагностика нефтегазового оборудования методами теории идентификационных измерений / А.А. Савостин, К.Т. Кошекков, Ю.Н. Кликушин. – М.: КноРус, 2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТАДЖИБАЕВ Алексей Ибрагимович – профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», без степени.
E-mail: a_tadzhibaev@inbox.ru

ДРАГАНЧЕВ Христо – профессор, Технический университет г. Варна, без степени.
E-mail: hristo.draganchev@gmail.com

ЯРОВОЙ Виктор Сергеевич – инженер, Акционерное общество «Теккноу», без степени.
E-mail: yarovoi@tek-know.ru

ГАЮРОВ Лутфулло – бакалавр, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: gayurov.l@edu.spbstu.ru

КОРКИН Леонид Михайлович – бакалавр, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: leonid_korkin@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 10.09.2021

REFERENCES

- [1] M.D. Genkin, A.G. Sokolova, Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mekhanizmov. – М.: Mashinostroyeniye, 1987.
- [2] Vibratsionnyy analiz / Ye.S. Golub i dr. – SPb.: PEIPK, 2009. – 85 s. [Biblioteka spetsialista po TDNK obyektov energetiki, Seriya 1. «Metodicheskiye osnovy TDNK», Vypusk 1.3 (4)].
- [3] Vliyaniye izmeneniya skorosti vrashcheniya vala rotornogo oborudovaniya na obrabotku v chastotnoy oblasti. Yu.P. Aslamov, A.P. Aslamov, I.G. Davydov, A.V. Tsurko. Doklady BGUIR, №3 (113), 2018.
- [4] A.A. Kharkevich, Spektry i analiz – М.: URSS, 2018.
- [5] Algorithms for refinement of the shaft rotational speed for solving the problems of vibration diagnostics of rotary equipment / Y. Aslamov [et al.] // WCCM. 2017. P. 15.
- [6] A.P. Naumenko, Veroyatnostno-statisticheskiye metody prinyatiya resheniy: teoriya, primery, zadachi / A.P. Naumenko, I.S. Kudryavtseva, A.I. Odinets; Minobrnauki Rossii, OmGTU. – Omsk: OmGTU, 2018.

- [7] **A.F. Zatsepin**, Akusticheskiy kontrol / A.F. Zatsepin; pod red. V.Ye. Shcherbina. – Yekaterinburg: Izd-vo ural. un-ta, 2016. – 211 s.
- [8] **V.A. Zorin**, Nadezhnost mekhanicheskikh sistem: uchebnik / V.A. Zorin. – M.: INFRA-M, 2017.
- [9] **V.S. Viktorov**, Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem. Izd. 2-ye, ispr. – M.: LENAND, 2016.
- [10] **A.A. Savostin**, Intellektualnaya diagnostika neftegazovogo oborudovaniya metodami teorii identifikatsionnykh izmereniy / A.A. Savostin, K.T. Koshekov, Yu.N. Klikushin. – M.: KnoRus, 2018.

THE AUTHORS

TADZHIBAEV Aleksey I. – *Federal State educational establishment PEIPK.*
E-mail: a_tadzhibaev@inbox.ru

DRAGANCHEV Hristo – *Technical University of Varna.*
E-mail: hristo.draganchev@gmail.com

YAROVOY Viktor S. – *Tek-know.*
E-mail: yarovoi@tek-know.ru

GAYUROV Lutfullo – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: gayurov.l@edu.spbstu.ru

KORKIN Leonid M. – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: leonid_korkin@mail.ru

Received: 10.09.2021