

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ТОКА И ВИБРАЦИИ

П.И. Степанов, В.В. Закураев

Новоуральский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Новоуральск

В работе описаны модель и алгоритм оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования. В качестве объекта контроля использовался асинхронный привод с зубчатой передачей. Оценка остаточного ресурса проводилась на основе комплексного анализа данных вибрации (с зубчатой передачей) и потребляемого тока асинхронным двигателем. В качестве диагностических параметров выделены виброскорость, виброускорение и ток в фазах обмотки статора приводного электродвигателя. Из выделенных диагностических параметров вычисляются коэффициенты дискретного вейвлет-преобразования (с применением материнского вейвлета Добеши, 8 уровней разложения). После чего выделяются диагностические признаки: среднеквадратические и пиковые (максимальные) значения каждого из вейвлет-коэффициентов и всего сигнала (общий уровень) по каждому диагностическому параметру. В работе приведена разработка и апробация модели и алгоритма оценки остаточного ресурса на основе анализа наиболее чувствительных диагностических признаков к возникновению и развитию неисправностей. В лабораторных условиях получены данные по изменению выделенных диагностических признаков в условиях отсутствия смазки в зубчатом редукторе. В работе показана возможность повышения эффективности оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования путем использования комплексного анализа тока и вибрации. Особенностью предлагаемых модели и алгоритма является возможность проводить оценку в условиях изменяющихся режимов работы и внешних нагрузок, что наиболее актуально для оборудования железнодорожного транспорта. Таким образом, на лабораторном стенде получены результаты оценки остаточного ресурса с достоверностью до 96%.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, диагностика, электропривод, остаточный ресурс.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из главных задач, решаемых на основе диагностирования, – предсказание состояния электромеханического привода в некоторый будущий момент времени (прогнозирование). Важнейшие аспекты прогнозирования – определение срока службы элементов привода или периодичности профилактических проверок и ремонтов.

Для прогнозирования технического состояния оборудования необходимо располагать моделью, обеспечивающей возможность такого прогноза. В данной статье излагаются основные процедуры создания модели и алгоритма прогнозирования остаточного ресурса оборудования.

В работах [1-4] предложены методы и средства повышения эффективности оценки технического состояния электромеханического оборудования за счет применения комплексного контроля на основе анализа информации разной физической природы (вибрационных и токовых сигналов). Обоснованы и исследуются такие диагностические признаки как коэффициенты вейвлет-преобразования указанных сигналов.

В работах [1-6] предложено решение задачи повышения эффективности процесса контроля технического состояния электромеханического

оборудования при помощи интеллектуального блока принятия решений.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Традиционно оценка остаточного ресурса работы элементов оборудования осуществляется преимущественно на основе построения трендов диагностических сигналов и установления определенных уровней амплитуд, соответствующих условному делению технического состояния на стадии «Предупреждение» (порог ТПМ – требует принятия мер) и «Авария» (порог НДП – недопустимо) (рис. 1) [7].

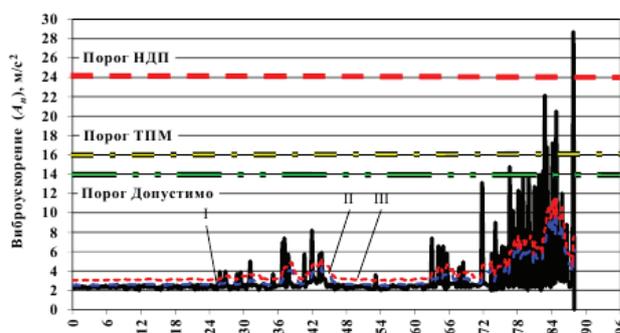


Рис. 1. Изменение амплитудных значений вибросигнала при диагностике подшипников насоса [7]

Значения этих уровней устанавливаются в долях амплитуд по отношению к исправному состоянию. Данный вид модели потери ресурса удовлетворительно работает на завершающих стадиях эксплуатации. В этом случае амплитуды сигналов тренда необратимо возрастают при интенсивном развитии дефекта. Однако данная модель не обеспечивает адекватное отражение процесса потери ресурса вследствие изменяющихся по различным причинам амплитуд диагностических сигналов.

Многочисленные работы, рассмотренные авторами в ходе изучения данного вопроса, показывают необходимость учета кинетических представлений о потере работоспособности изделия. Важность учета зависимости времени разрушения (деградации) материала изделия при изменяющихся внешних воздействиях: силовых, тепловых, химических и др. – подтверждается положениями кинетической концепции длительной прочности, выдвинутой академиком С.Н. Журковым и его научной школой. Плодотворное применение данной идеи описано во многих работах [8, 9].

В основе этих представлений лежит экспоненциальная зависимость времени деградации (разрушения) материала от действующих напряжений, температур, энергии активации разрушения и структуры материала.

В соответствии с характером изменения времени до разрушения изделия адекватно должен изменяться и характер диагностических сигналов. Примером, подтверждающим кинетический характер деградации изделия, является экспоненциальный рост амплитуд вибросигналов подшипников качения в конечной стадии работы (рис. 1). На рисунке приведены зависимости роста амплитуд «выбросов» вибропараметров подшипников центробежных насосов [7]. Изменение амплитуды параметров определяется по следующей зависимости:

$$A_i(t) = A_1 \cdot e^{-n_i \cdot t_i}, \quad (1)$$

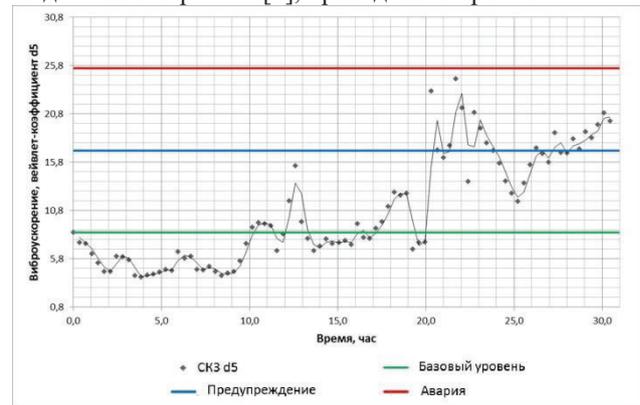
где A_1 – амплитуда первого выброса (флуктуации) вибропараметра; A_i – амплитуда последующих выбросов; n_i – коэффициент экспоненциального нарастания вибрации; t_i – интервалы времени между первым и последующим выбросами.

Выявленные закономерности процесса стадийного накопления повреждений подшипников позволяют реализовать мониторинг и оперативную диагностику насосного агрегата путем выделения выбросов трендов вибрации [7].

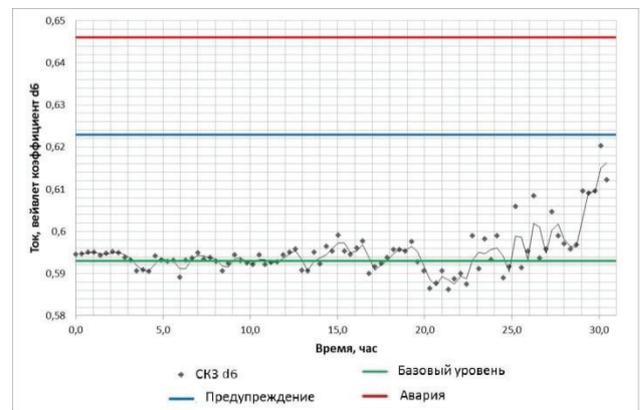
Для создания модели расчета остаточного ресурса электропривода приведены лабораторные стендовые испытания с целью получения трендов изменения диагностических сигналов путем создания определенного вида дефекта.

Испытания по прогнозированию остаточного ресурса электромеханического оборудования были

приведены в работе [3] для зубчатой передачи (червячный редуктор) в условиях отсутствия смазки (ускоренные испытания на лабораторном стенде в соответствии с ГОСТ Р 51372-99, коэффициент ускорения – 333). Использовался лабораторный стенд с асинхронным двигателем и зубчатой передачей. Мощность асинхронного электродвигателя $P=0,18\text{кВт}$. Частота вращения $n=1350\text{об/мин}$. Червячный редуктор МЧ-40М-31,5-47,6-51-5-1С-У3. Нагрузка на выходном валу червячного редуктора $M=32\text{Н}\cdot\text{м}$. Результаты полученных изменений чувствительных диагностических признаков, выделенных в работе [4], приведены на рис. 2.



а)



б)

а) СКЗ вейвлет-коэффициента d5 виброускорения и его тренд;
б) СКЗ вейвлет-коэффициента d6 тока и его тренд

Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований с установленными уровнями состояния при отсутствии смазки в редукторе

В соответствии с описанной идеей, модель потери ресурса оборудования при совокупности диагностических сигналов вибрации и тока в общем виде представляется следующим образом:

1. Начальные условия задаются исходя из следующих положений: A_n^0 – начальное значение амплитуд вибросигналов (значимых диагностических параметров), устанавливаются на основе данных ГОСТ по вибродиагностике. A_n^m – начальное значение

амплитуд токовых параметров, устанавливаются по данным заводских стендовых испытаний оборудования.

2. Значения амплитуд A_k^e и A_k^m при длительной эксплуатации определяются по результатам испытаний изношенного оборудования на заводских стендах. При отсутствии данных необходимо проведение ускоренных испытаний в тяжело нагруженных режимах.

3. Время работы оборудования, соответствующее данным значениям амплитуд A_n^e , A_n^m , A_k^e и A_k^m , устанавливается по следующим условиям:

t_n^e – по наработке подшипников (в соответствии с ГОСТ);

t_n^m – по гарантированной заводом-изготовителем наработке электродвигателей (редукторов);

t_k^e , t_k^m – периоды времени, соответствующие амплитудам A_k^e и A_k^m , устанавливаемые на основании фиксированного значения отказа элемента при пробеге привода и по записи трендов диагностических параметров.

При этом следует полагать, что возникающие в нагруженном узле дефекты накапливаются, и критерием макроскопического разрушения (отказа) при изменяющихся во времени средних или локальных нагрузок, является уравнение, которое выражает принцип линейного суммирования повреждений:

$$\sum_{k=1}^n \frac{\Delta t_k}{t(k)} = 1, \quad (2)$$

где k – режим нагружения; Δt_k – время работы элемента привода при k -ом режиме нагружения; $t(k)$ – долговечность элементов привода при k -ом режиме нагружения.

В соответствии с (2) остаточный ресурс элемента привода Po определяется следующим путем:

$$Po = 1 - \left(\frac{\Delta t_1}{t_1} + \frac{\Delta t_2}{t_2} + \dots + \frac{\Delta t_k}{t(k)} \right), \quad (3)$$

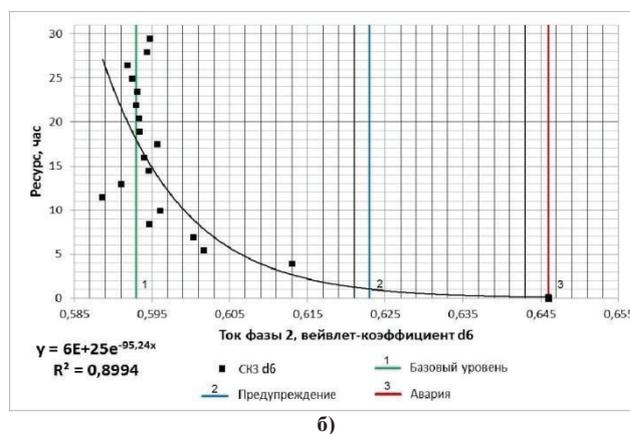
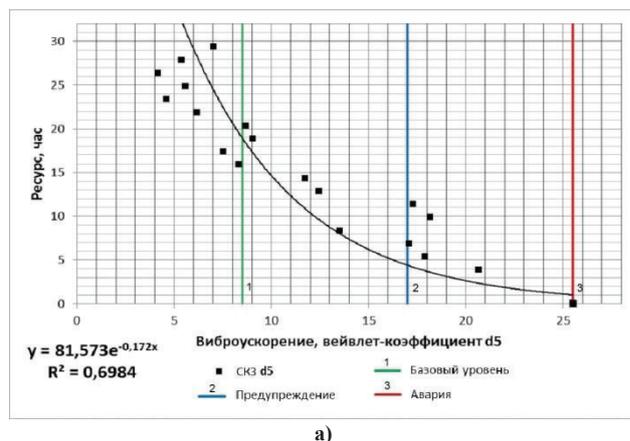
где Δt_1 , Δt_2 , ..., Δt_k – время работы элемента привода при k -ом режиме нагружения; t_1 , t_2 , ..., t_k – долговечность элементов привода при k -ом режиме нагружения.

Таким образом, время до отказа оборудования:

$$To = T_n \cdot \left(1 - \left(\frac{\Delta t_1}{t_1} + \frac{\Delta t_2}{t_2} + \dots + \frac{\Delta t_k}{t(k)} \right) \right), \quad (4)$$

где T_n – нормативное значение ресурса оборудования, час.

Для решения поставленной задачи целесообразно перестроить общепринятые графики зависимости амплитуды от времени работы (изображения трендов, рис. 2) в координатах $t_i = f(A_i)$ (рис. 3).



а) СКЗ вейвлет-коэффициента d5 виброускорения; б) СКЗ вейвлет-коэффициента d6 тока

Рис. 3. Усредненная зависимость времени эксплуатации оборудования от амплитудных значений диагностических признаков

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА УЗЛОВ ПРИВОДА

На основе представленной модели потери ресурса оборудования алгоритм определения остаточного ресурса узлов привода представляется следующим образом:

1. Получение предварительной зависимости $t=f(A_i)$ времени работы оборудования до отказа от амплитудных значений диагностических признаков. Получение данной зависимости возможно осуществлять тремя путями:

а) ускоренные стендовые испытания при нормальных условиях и тяжело нагруженных режимах. Графическое представление полученной зависимости на основании данных по исправному оборудованию и установленных уровней состояний приведено на рис. 3;

б) целенаправленные испытания нового оборудования и поступающего на ремонт в результате износа или отказа. В этом случае накапливаются статистические данные амплитудных значений

диагностических параметров, получаемых на стенде, и соответствующего времени наработки узлов;

в) получение исходных данных путем математического моделирования некоторых фрагментов эксплуатационных условий работы оборудования.

2. В период эксплуатации оборудования непрерывно осуществляется запись диагностических признаков, и строится тренд вида, изображенного на рис. 2.

3. Остаточный ресурс привода, работающего при различных нагрузках, определяется следующим образом. На основе периодических замеров амплитудных значений диагностических признаков (коэффициентов вейвлет-преобразования) строится тренд их изменения. В силу того, что амплитуды сигналов за период построения тренда имеют различные уровни (в соответствии с режимом нагружения), потеря ресурса привода происходит согласно выражению (3). Потеря доли ресурса $\frac{\Delta t_i}{t_i}$

также соответствует режиму нагружения. Значение Δt_i соответствует времени работы при амплитуде диагностического сигнала A_i . Величина t_i соответствует долговечности привода при данной амплитуде и определяется из графика зависимости установленного ресурса работы привода (рис. 3). Полная потеря ресурса (уровень «Авария») достигается при условии (2). А время до отказа оборудования в соответствии с нормативным ресурсом вычисляется по формуле (4).

Для электропривода движущегося транспорта, например электропоезда, измерение вибродиагностических сигналов является достаточно сложной задачей. Поэтому построение тренда вибросигнала целесообразно на основе измерений при проведении технического осмотра в депо. В этом случае полное время работы привода при различных режимах следует производить по данным значений тренда токовых сигналов (при наличии корреляционной связи с вибрационными сигналами).

В соответствии с предложенной моделью потери ресурса и алгоритмом оценки остаточного ресурса узлов оборудования значения времени работы при ускоренных испытаниях переведены в нормативный ресурс редуктора, согласно методике ускоренных испытаний, ГОСТ Р 61372-99 (коэффициент ускорения – 333). Значение нормативного ресурса червячного редуктора принято 10000 час.

Пересчитанные данные для нормативных условий работы редуктора при возникновении неисправности «Отсутствие смазки» приведены в табл. 1.

В результате проведенного исследования было установлено, что предложенная модель и алгоритм адекватно отражают потерю ресурса в полном соответствии с реальным техническим состоянием

редуктора. Например, модель предсказывает полную потерю ресурса в момент времени, когда исследуемые признаки превышают уровень «Предупреждение» (около 18-20 час, см. рис. 2). Для оценки точности прогноза был использован коэффициент несоответствия Тейла, который составил для прогноза за половину времени испытаний: $KT_v = 0,4$, $KT_m = 0,08$, а за все время испытаний: $KT_v = 0,04$, $KT_m = 0,04$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные данные лабораторных испытаний при использовании предложенных модели и алгоритма позволяют повысить эффективность оценки остаточного ресурса работы, которая может быть выражена в повышении достоверности до 96%.

На основе проведенного исследования показана связь диагностических параметров тока и вибрации, а также предложен алгоритм оценки остаточного ресурса электромеханического оборудования с хорошей достоверностью. Это позволит перейти от планового технического обслуживания к обслуживанию по текущему техническому состоянию с учетом прогнозов, что приведет к значительному снижению экономических издержек на предприятии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Степанов, П.И. Комплексная токовая и вибродиагностика электромеханических систем [Текст] / П.И. Степанов, С.В. Лагуткин, Ю.Р. Никитин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 160-165.
2. Степанов, П.И. Механические и электрические диагностические параметры электрических приводов [Текст] / П.И. Степанов, С.В. Лагуткин, Ю.Р. Никитин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2. – С. 59-63.
3. Степанов, П.И. Алгоритм прогнозирования остаточного ресурса электромеханического оборудования на основе комплексного анализа токовых и вибрационных сигналов [Текст] / П.И. Степанов, В.В. Закураев // Омский научный вестник. – 2017. – № 3 (153). – С. 99-103.
4. Степанов, П.И. Разработка и тестирование блока принятия решений для системы контроля технического состояния электромеханического оборудования [Текст] / П.И. Степанов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 1. – С. 108-113.
5. Stepanov, P., and Nikitin, Yu, "Diagnostics of Mechatronic Systems on the Basis of Neural Networks with High-Performance Data Collection," *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*. Springer International Publishing Switzerland, pp. 443-440, 2014.
6. Степанов, П.И. Логико-лингвистическая модель диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса мехатронных объектов [Текст] / Ю.Р. Никитин, И.В. Абрамов, П.И. Степанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 79-87.
7. Тарасов, Е.В. Мониторинг подшипников качения в условиях их многостадийных отказов на основе анализа трендов виброускорения: автореф. дис. к.т.н.: 05.11.13 [Текст] / Е.В. Тарасов; ОмГТУ. – Омск, 2018. – 24 с.
8. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель, А.И. Слущер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
9. Журков, С.Н. Проблема прочности твердых тел [Текст] / С.Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1957. – №11. – С. 78-82.

Степанов Павел Иванович – старший преподаватель кафедры Автоматизации управления, Новоуральский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НТИ НИЯУ МИФИ), тел. (34370)93805, e-mail: stepanov_pi@mail.ru

Закураев Виктор Владимирович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой Технологии машиностроения, Новоуральский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НТИ НИЯУ МИФИ), тел. (34370)93805, e-mail: vzakurayev@mail.ru

Табл. 1. Данные потери ресурса работы редуктора в условиях отсутствия смазки

Время работы при ускоренных испытаниях, t_i , час	Время, приведенное к нормативу, T_i , час	Усредненное значение диагностического признака, d_i	Доля ресурса при ускоренных испытаниях, d_{ti}/t_i	Доля ресурса, приведенная к нормативу, d_{ti}/T_i	Ресурс при ускоренных испытаниях, P_0	Время до отказа по нормативу, T , час
Виброускорение, вейвлет-коэффициент d5						
29,4	9550	7,027	0,062	0,052	0,95	9484
...
21,9	7300	6,171	0,053	0,044	0,77	7656
...
12,9	4600	12,419	0,156	0,144	0,23	2276
Ток фазы 2, вейвлет-коэффициент d6						
29,4	9550	0,595	0,103	0,086	0,91	9135
...
21,9	7300	0,593	0,087	0,070	0,56	5591
...
11,4	4150	0,589	0,058	0,043	0,05	493

MODEL AND ALGORITHM FOR ESTIMATING THE RESIDUAL LIFE OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT BASED ON COMPREHENSIVE ANALYSIS OF CURRENT AND VIBRATION

P.I. Stepanov, V.V. Zakuraev

Novouralsk Technology Institute of National Research Nuclear University "MEPhi", Novouralsk

The paper describes a model and an algorithm for assessing the residual life of electromechanical equipment. An asynchronous gear drive was used as a control object. The residual life assessment was carried out on the basis of a comprehensive analysis of vibration data (from a gear drive) and the current consumed by an induction motor. Vibration velocity, vibration acceleration and current in the phases of the stator winding of the drive electric motor are distinguished as diagnostic signs. From the selected diagnostic features, the coefficients of the discrete wavelet transform are calculated (using the mother Daubechies wavelet, 8 decomposition levels). After that, diagnostic features are identified: RMS and Peak (maximum) values of each of the wavelet coefficients and the entire signal (general level) for each diagnostic feature. The paper presents the development and testing of a model and an algorithm for assessing the residual resource based on the analysis of the most sensitive diagnostic signs to the occurrence and development of faults. In laboratory conditions, data were obtained on the change in the identified diagnostic signs in the absence of lubrication in the gear reducer. The paper shows the possibility of increasing the efficiency of assessing the residual life of electromechanical equipment by using a comprehensive analysis of current and vibration. A feature of the proposed model and algorithm is the ability to conduct an assessment under conditions of changing operating modes and external loads, which is most important for railway equipment. Thus, on the laboratory bench, the results of the residual life assessment were obtained with a reliability of up to 96%.

Index terms: non-destructive testing, diagnostics, electric drive, residual life.

REFERENCES

1. Stepanov, P.I. Integrated current and vibration diagnostics of electromechanical systems [Text] / P.I. Stepanov, S.V. Lagutkin, Yu.R. Nikitin // Intelligent systems in production. – 2013. – № 2. – p. 160-165.
2. Stepanov, P.I. Mechanical and electrical diagnostic parameters of electric actuators [Text] / P.I. Stepanov, S.V. Lagutkin, Yu.R. Nikitin // Intelligent systems in production. – 2014. – № 2. – p. 59-63.
3. Stepanov, P.I. An algorithm for predicting the residual life of electromechanical equipment based on a comprehensive analysis of current and vibration signals [Text] / P.I. Stepanov, V.V. Zakuraev // Omsk Scientific Bulletin. – 2017. – № 3 (153). – p. 99-103.
4. Stepanov, P.I. Development and testing of the decision-making unit for the control system of the technical condition of electromechanical equipment [Text] / П.И. Степанов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 1. – p. 108-113.
5. Stepanov, P., and Nikitin, Yu, "Diagnostics of Mechatronic Systems on the Basis of Neural Networks with High-Performance Data Collection," *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*. Springer International Publishing Switzerland, pp. 443-440, 2014.
6. Stepanov, P.I. Logical-linguistic model for diagnosing and predicting the residual life of mechatronic objects / Yu.R. Nikitin, I.V. Abramov, P.I. Stepanov // Intelligent systems in production. – 2013. – № 2. – p. 79-87.
7. Tarasov, E.V. Monitoring of rolling bearings under conditions of their multistage failures based on the analysis of vibration acceleration trends: dissertation abstract k.t.n.: 05.11.13 / E.V. Tarasov; OmGTU. – Omsk, 2018. – 24 p.
8. Regel, V.R. The kinetic nature of the strength of solids / V.R. Regel, A.I. Slutsker, E.E. Tomashevsky. – M.: Science, 1974. – 560 p.
9. Zhurkov, S.N. Problem of the strength of solids / S.N. Zhurkov // Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. – 1957. – №11. – p. 78-82.

Stepanov Pavel Ivanovich – senior teacher of department of automation control, Novouralsk Technology Institute of National Research Nuclear University "MEPhi", (34370)93805, e-mail: stepanov_pi@mail.ru.

Zakuraev Viktor Vladimirovich – head of department of mechanical engineering technology, Novouralsk Technology Institute of National Research Nuclear University "MEPhi", (34370)93805, e-mail: vzakurayev@mail.ru.