



13. Davis R., King J. An overview of production systems. Machine Intelligence, 1977. Vol. 8. Ellis Horwood Limited, Chichester. Pp. 300–332.

14. Protalinsky O.M., Shcherbatov I.A., Stepanov P.V. Identification of the actual state and entity availability forecasting in power engineering using neural-network technologies. *Proceedings in Journal of Physics: Conference Series Ser. "International Conference "Problems of Thermal Physics and Power Engineering", PTPPE 2017"* 2017. P. 012289.

15. Shcherbatov I.A. Global'naya tsel' slozhnoi slaboformalizuemoi tekhnicheskoi sistemy. Monografiya [The global goal of a complex, poorly formalized technical system. A monograph]. Astrakhan' state technical un-ty Publ. Astrakhan', 2017. 100 p.

Информация об авторах

Authors

Щербатов Иван Анатольевич – к. т. н., доцент, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления тепловыми процессами», Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, e-mail: ShcherbatovIA@mpei.ru.

Ivan Anatol'evich Shcherbatov – Ph. D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Assoc. Prof. at the Subdepartment of Automated Control Systems of Thermal Processes, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, e-mail: ShcherbatovIA@mpei.ru.

Для цитирования

For citation

Щербатов И. А. Интеллектуализация информационных систем управления ремонтами предприятий энергетики / И. А. Щербатов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 31–37. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).31–37

Shcherbatov I. A. Intelktualizatsiya informatsionnykh sistem upravleniya remontami predpriyatii energetiki [Intellectualization of information for power plants repair management systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 31–37. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).31–37

УДК 620.171: 621.039.548.58

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).37–45

А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин

Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

Дата поступления: 15 июля 2019 г.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СНИЖЕНИЯ РЕСУРСА УНИКАЛЬНЫХ МАШИН

Аннотация. В статье теоретически обосновываются закономерности снижения ресурса машин в процессе их эксплуатации. Математическое описание этих закономерностей построено на основе графической интерпретации прогноза и коррекции, которая позволяет представить взаимосвязь между исходными техническими показателями (в начальный момент, при изготовлении), фактическими (в настоящий момент времени) и прогнозируемыми (на последующий период эксплуатации), характеризующими повреждение и износ узлов и деталей машин в течение определенного временного интервала. Однако, с помощью функции «предиктор-корректор» точное определение ресурса оказалось возможным только при равномерном шаге сетки, но, как известно из практики, прогнозирование ресурса машин проводится преимущественно с неравномерным шагом сетки, поскольку техническое диагностирование в процессе эксплуатации затруднительно осуществлять регулярно через равные промежутки времени. Установлено также, что графическая интерпретация показывает только закономерность перехода исходного состояния к предельному, но на практике для исследователя-прикладника необходимо построение кривой, отражающей истинное снижение ресурса машины при сокращении запасов прочности узлов и деталей. Исследования и практика показывают, что одной из мер по снижению рисков эксплуатации машин является создание модели прогнозирования ресурса, которая учитывает наибольшее количество факторов, влияющих на него, а также максимальное число данных технической диагностики, результатов оценки технического состояния и остаточной прочности элементов. Для решения этой задачи представлена экспоненциальная зависимость, показывающая снижение ресурса от степени износа, дефектов, эффективности технического диагностирования и степени опасности при достижении предельного состояния на различных этапах жизненного цикла машины. Математическое описание этой закономерности может быть использовано для прогнозирования начального, текущего и остаточного ресурса единичных, уникальных машин и технических устройств.

Ключевые слова: безопасность, вероятность, диагностирование, уникальная машина, модель, ресурс, риск эксплуатации, техническое состояние.

A. P. Cherepanov, P. K. Lyapustin

Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

Received: July 15, 2019

THE PATTERN OF DECREASE OF A RESOURCE OF UNIQUE MACHINES



Abstract. *The article provides theoretical substantiation of the regularity of reducing the life of machines in the process of their operation. The mathematical description of the resource reduction regularity is shown on the basis of a graphical interpretation of the forecast and correction. This makes it possible to present the relationship between the original (at the initial moment, in the manufacture), the actual (at the present time) and the predicted (for the subsequent period of operation) technical indicators characterizing the damage and wear of components and machine parts during a certain time interval. However, with the help of the predictor-corrector function, the exact definition of the resource was possible only with a uniform grid step, but, as is known from practice, the resource of machines is predicted mainly with an uneven grid step, as it is difficult to carry out technical diagnosis regularly, at fixed intervals during operation. It is also established that the graphical interpretation shows only the regularity of the transition of the initial state to the limit state, but for the applied researcher it would be more important to build a curve that would reflect the true decrease in the resource of the machine with a decrease in the strength reserves of its components and parts. Research and practice show that one of the measures to reduce the risks of machine operation is to create a model of resource forecasting, which takes into account the largest number of factors affecting the resource, as well as the most complete use of technical diagnostics data, the results of the assessment of the technical condition and the residual strength of the machine elements. To solve this problem, an exponential dependence is presented, which shows the reduction of the resource from the degree of wear, defects, the effectiveness of technical diagnosis and the degree of danger when reaching the limit state at different stages of the life cycle of the machine. Mathematic description of this pattern can be used to predict the initial, current and residual life of single, unique machines and technical devices.*

Keywords: *safety, probability, diagnosis, unique machine, model, resource, operating, technical condition.*

Введение

Первоначально задаваемый ресурс эксплуатации машины (проектный ресурс) требует уточнения при изготовлении путем оценки исходного технического состояния по результатам первичного технического диагностирования и ресурсно-прочностных исследований, на основе которых заводом-изготовителем определяется исходный ресурс и назначается срок безопасной эксплуатации. Задача оценивания остаточного ресурса является второстепенной и решается после выработки срока, назначенного заводом-изготовителем. В отдельных случаях остаточный ресурс может определяться и до истечения этого срока, если возникает необходимость. По окончании назначенного срока ставится задача прогнозирования момента наступления предельного состояния, обоснования сроков осмотров, технического диагностирования, изучения, устранения или снижения вероятности развития деградиационных процессов, приводящих к отказам. Величина остаточного ресурса машины определяется временем наступления предельного состояния, которое оценивается по фактической наработке, мониторингу и оперативной диагностике эксплуатационных и технических параметров (толщин стенок и состояния металла, циклических колебаний и вибрации и др.) и далее по окончанию назначенного срока безопасной эксплуатации или результатам оценки технического состояния после выработки полного ресурса либо его части.

В любом из перечисленных случаев оценка проектного, исходного, текущего и остаточного ресурса связана с необходимостью исключения аварий и преждевременного выхода из строя как всего комплекса машин, так и отдельного технического устройства, входящего в него. Для опасных производств и потенциально опасных машин повреждения любого элемента детали или узла, в

том числе на первый взгляд не относящегося к основным, могут быть обусловлены изнашиванием. Повреждения и отказы, вызванные другими факторами, например, превышением эксплуатационных параметров, брать в расчет не будем. Рассмотрим задачу состоящую, прежде всего, в исключении отказов, вызванных износом узлов, деталей и их элементов, в чем и заключается снижение риска при эксплуатации, как всего комплекса машин, так и отдельных технических устройств. Следовательно, остаточный ресурс в настоящее время оценивается результатами непосредственного измерения контролируемых параметров и обработкой априорной информации по техническому состоянию на основе ранее проведенных испытаний, технического диагностирования и ресурсно-прочностных исследований при предыдущих режимах эксплуатации. Эта априорная информация, а также вновь полученные данные о режимах эксплуатации, непосредственного измерения контролируемых параметров, испытаний и ресурсно-прочностных исследований на период текущей оценки технического состояния могут быть применены для прогнозирования ресурса и назначения срока на последующий период безопасной эксплуатации. Таким образом, априорная и вновь полученная оценка технического состояния, так или иначе, связана с параметрами, изменяющимися в процессе изнашивания, и могут отражать закономерности накопления общих и отдельных повреждений элементов, узлов и деталей машин.

Основная часть

Прогнозирование ресурса машин проводится с использованием различного вида известных моделей, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки, однако на практике применяется только небольшая их часть. Рассмотрим коротко некоторые виды применяемых моделей ресурса.



Вероятностные модели определения ресурса [1-3] построены на основе вероятности безотказной работы и определяются «кривой выживаемости» (survivor curve) типа «Айова» [4], которая характеризует процесс выбытия элемента, детали или узла машины из эксплуатации вследствие износа по мере достижения предельного состояния и служит для определения остаточного срока службы машины. К оценке остаточных срока службы и ресурса машин применимы также и другие модели [5]. В теории надежности сложных технических систем и конструкций наряду с распределением Вейбулла [3] для определения срока службы используют логарифмическое нормальное распределение [6]. При этом выбор вида распределения может определяться как преобладающими физическими процессами деградации и характером износа, так и наличием априорной информации, но эти модели применимы преимущественно при исследовании большой группы изделий, а испытания проводятся, как известно, по наработке на отказ. Исследования показали, что приведенные модели применимы для анализа преимущественно серийно выпускаемых изделий [3].

Существует большая группа единичных и уникальных машин и технических устройств, применяемых для осуществления отдельных технологических процессов, в том числе аппаратов химических производств, у которых основным видом развития отказа является накопление повреждений в результате изнашивания элементов деталей и узлов. Для них разработан гамма-процентный ресурс, оцениваемый с заданной вероятностью и относительной ошибкой расчета, который приведен в отдельных работах [3, 7].

Модели, использующие статистический подход [8], наиболее приемлемы для оценки физической деградации машин и их остаточной стоимости. Остаточный срок службы в них рассматривается как случайная величина, которую можно описать вероятностными моделями [3], что расширяет возможности линейной, экспоненциальной, детерминированной модели износа и методов его оценки. Модели прогнозирования ресурса [8] наиболее полно соответствуют физическим процессам изнашивания и учитывают то, что фактический срок службы с достаточной вероятностью безотказной работы может превышать нормативный срок службы (ресурс). Однако опасность машин для окружающей среды, степень износа и оценка их фактического технического состояния (ТС) по результатам технического диагностирования (ТД) в этом случае не учитываются.

Модель прогнозирования ресурса сосудов и

аппаратов нефтехимических производств, основанная на данных ТД и на выборе критериев предельных состояний получила распространение на практике и в нормативных документах [9], однако она обусловлена погрешностями оценки ресурса от 50 до 114 % [10]. Это связано с тем, что в ней применен подход к оценке ресурса по скорости коррозионного износа стенок, количеству циклов нагружения и снижению хрупкой прочности основных несущих элементов машин. В модели не учитываются запасы прочности, запасы толщины стенок и иные факторы, влияющие на ресурс, что в результате и приводит к снижению точности оценки ресурса машин.

Из сказанного следует, что мерой снижения риска при эксплуатации единичных и уникальных машин и технических устройств, во-первых, является создание модели прогнозирования ресурса, учитывающей закономерность изменения параметров технического состояния; во-вторых, для снижения риска следует учитывать наибольшее количество факторов, влияющих на ресурс, и полнее использовать данные ТД. В работах Н.А. Махутова показано, что наиболее существенное влияние на ресурс оказывают запасы прочности несущих элементов машин [11].

В данной статье обосновывается закономерность снижения ресурса с применением модели, основанной на переходе от исходного состояния к предельному на протяжении всего жизненного цикла машины. Эта модель в общем виде была рассмотрена в рамках концепции прогнозирования ресурса [12].

Математическое описание закономерности снижения ресурса машин

Закономерность снижения ресурса машин рассмотрим на основе метода Эйлера прогноза и коррекции. Описание функции ресурса или срока эксплуатации T покажем для некоторого множества значений n , например, (C_1, C_2, \dots, C_n) . Функцию для определения ресурса выразим общим дифференциальным уравнением n -го порядка значений (C_1, C_2, \dots, C_n) :

$$\{C_1, C_2, \dots, C_n\}y = f(n, T, C_1, C_2, \dots, C_n) \quad (1)$$

Сумма первообразной подынтегрального выражения и постоянная интегрирования выразится как:

$$\int g(n)dn = G(n) + C. \quad (2)$$

Для решения уравнения (1) необходимо n интегрирований, тогда появляется такое же число постоянных интегрирования (C_1, C_2, \dots, C_n) . Если величинам (C_1, C_2, \dots, C_n) придать некоторые значения при дополнительных условиях и вычислить



все постоянные интегрирования (2), то можно получить частное решение этого уравнения, которое могло бы дать искомую функцию $y(n)$, но это затруднительно даже для уравнений первого порядка [13].

Попробуем описать функцию ресурса T с помощью метода (схемы) Хойна, выполняющего функцию «предиктор» [14], и метода Эйлера, с помощью которого реализуется функция «корректор» [15, 16]. По модифицированному методу Эйлера вычисления проводят в два этапа – соответственно, прогноз и коррекция:

$$\tilde{y}_i = y_{i-1} + (x_i - x_{i-1})f(x_{i-1}, y_{i-1}). \quad (3)$$

$$y_i = y_{i-1} + \frac{(x_i - x_{i-1})}{2} [f(x_{i-1}, y_{i-1}) + f(x_i, \tilde{y}_i)]. \quad (4)$$

«Предиктор-корректор» является одним из наиболее популярных многошаговых методов и реализуется, например, формулой Адамса, при различных i некоторого интервала изменения состояния объекта. Для предиктора можно применить 4-х шаговую формулу Адамса – Башфорда, а для ее коррекции – 4-х шаговую формулу Адамса – Моултона [17].

Представим ресурс T как составляющую интервала между первым (t_1), вторым (t_2), ..., i -м (t_i) техническим диагностированием. Примем ее на ожидаемый период эксплуатации за величину $k = 1 \dots i$, как величину, учитывающую износ. Предположим, что за предыдущий интервал времени T_{k+1} запас прочности составлял величину n_{k+1} , на фактический момент времени T_k запас прочности равен n_k , а на ожидаемый период времени (эксплуатации) T_{k-1} снижение запаса прочности достигает величины n_{k-1} . При этом соотношение между предыдущим, настоящим и последующим запасами прочности выражено как $n_{k+1} \geq n_k \geq n_{k-1}$, соответственно, соотношение между предыдущим, настоящим и последующим периодом эксплуатации составит $T_{k+1} \geq T_k \geq T_{k-1}$. Уравнение (1) можно свести к поиску значения интервала времени T в узловых точках $\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$, где известны (n_0, T_0) и $T_0 = y(n_0)$, принятые за отсчет времени эксплуатации, чтобы определить функцию $T(n)$.

Аппроксимация производной T и независимой n образует узлы равномерной сетки, тогда численным решением уравнения (1) вычисляется функция вида $T(n)$ в точках $\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ в моменты времени $\{T_{k+1}, T_k$ и $T_{k-1}\}$ по независимым значениям n_{k+1}, n_k и n_{k-1} , которые можно принять как узлы координатной сетки. При $k = 1, \dots, i$, или шаге Δn интегрирования дифференциальному уравнению (1) можно придать физический смысл и выразить его, например, как параметр износа. Износ, как известно, выражается снижением запаса прочности, запаса толщины стенки или запаса

на износ в контактирующих парах (например, парах трения), который происходит за период времени $\{T_{k+1}, T_k$ и $T_{k-1}\}$ и может быть определен на соответствующем шаге этой сетки. Для вычисления функции вида $T(n)$, принятой в качестве ресурса, зависящего от снижения одного или нескольких параметров износа, которые являются производными этой функции в точках $\{n_1, n_2, \dots, n_k\}$, сделаем попытку применить численные методы решения для обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка, решая его относительно производной и полагая, что правая часть уравнения не будет зависеть от первой производной:

$$\frac{dT}{dn} = F(n, T). \quad (5)$$

Умножим левую и правую части уравнения (5) на величину dn , получим уравнение вида:

$$dT = F(n, T)dn. \quad (6)$$

Левую и правую части уравнения (6) между k -ым и $(k+1)$ -ым узлами сетки проинтегрируем и получим выражение в $(k+1)$ узле, которое значениями (n) и (T) определено в k -ом узле сетки:

$$\int_{n_k}^{n_{k+1}} dT = \int_{n_k}^{n_{k+1}} F(n, T)dn \text{ и } T_{k+1} = T_k + \int_{n_k}^{n_{k+1}} F(n, T)dn. \quad (7)$$

Аналогично можно получить выражение между k -ым и $(k-1)$ -ым узлами сетки:

$$\int_{n_{k-1}}^{n_k} dT = \int_{n_{k-1}}^{n_k} F(n, T)dn \text{ и } T_{k-1} = T_k + \int_{n_{k-1}}^{n_k} F(n, T)dn.$$

Графическая интерпретация закономерности перехода исходного состояния к текущему и далее к предельному (рис. 1) с одной стороны дает возможность представить взаимосвязь между исходным состоянием машин (прошлым), фактическим (настоящим) и прогнозируемым (будущим) за интервал времени T аналогично методу «предиктор-корректор» [13]. Если параметр износа изменился между узлами равномерной сетки [Ошибка! Источник ссылки не найден.], то функция, показывающая его снижение, может быть записана уравнением:

$$\frac{dT}{dn} \approx \frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{T_{k+1} - T_k}{n_{k+1} - n_k} = F(n_k, T_k), \quad (8)$$

где T_k – искомое значение (настоящее) функции в точке n_k ; T_{k+1} – искомое значение (предыдущее) функции в точке n_{k+1} ; ΔT – интервал времени между предыдущим и настоящим искомыми значениями функции в точках n_{k+1} и n_k ; n_k – запас прочности в настоящий момент времени; n_{k+1} – запас прочности в предыдущий момент времени.

Преобразовав уравнение (8) с равномерным шагом сетки интегрирования получим итерационные уравнения, по которым можно было бы вы-

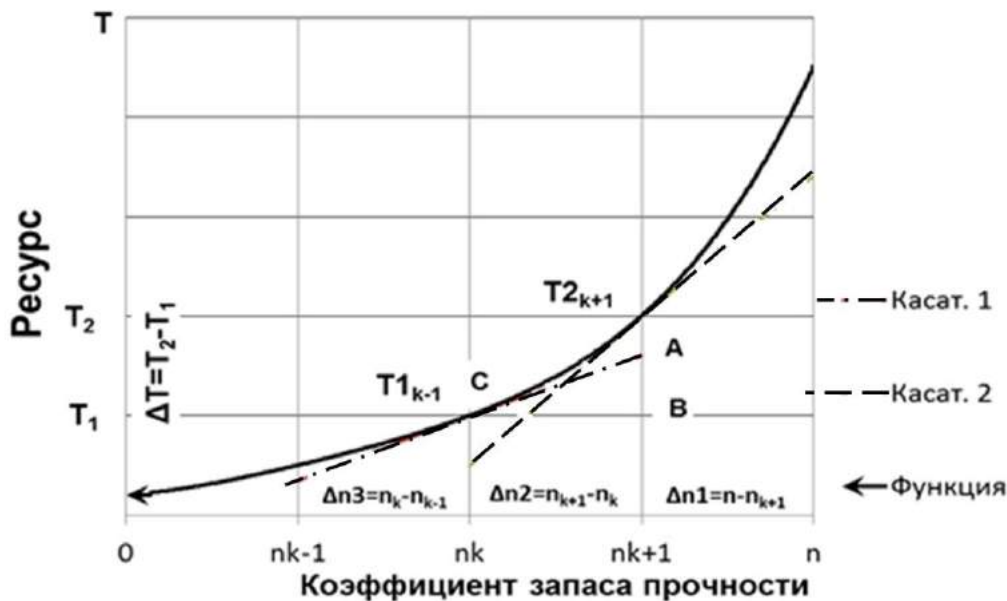


Рис. 1. Графическая интерпретация закономерности перехода исходного к текущему и далее к предельному состоянию машины

числить величину (T_{k+1}) за предшествующий период или (T_{k-1}) за последующий период эксплуатации, если известно (T_k) в точке (n_k), тогда уравнения будут иметь вид:

– за предшествующий период:

$$T_{k+1} = T_k + F(n_k, T_k)\Delta n; \quad (9)$$

– за последующий период:

$$T_{k-1} = T_k - F(n_k, T_k)\Delta n.$$

Из уравнения (9) видно, что $F(n_k, T_k)$ является значением производной функции $T(n)$ в точке

$$n = n_k - \frac{dT}{dn} \Big|_{n=n_k}. \quad (10)$$

Геометрически (см. рис. 1) выражение (10) можно представить как тангенс угла наклона касательной, проведенной к графику функции $T(n)$ в некоторой точке $n = n_k$, построив прямоугольный треугольник ABC и заменив функцию $T(n)$ прямой линией в точке C касательной к графику на отрезке интегрирования, а также в точках $n = n_k$, $n = n_{k+1}$, $n = n_{k-1}$ и т. д.

Например, правее точки C (n_k), на шаге $\Delta n2 = n_{k+1} - n_k$ определим:

$$T_{k+1} - T_k = (n_{k+1} - n_k)T'(n_k) = \Delta n1 F(n_k, T_k). \quad (11)$$

Аналогично для смежного с ним треугольника, расположенного левее точки C (n_k), на шаге, определим:

$$T_k - T_{k-1} = (n_k - n_{k-1})T'(n_k) = \Delta n2 F(n_k, T_k). \quad (12)$$

Таким образом, графическая интерпретация прогноза и коррекции (см. рис. 1) показывает взаимосвязь между прошлым состоянием машины, настоящим и будущим состоянием за интервал времени T . Разности, полученные уравнениями (11) ($T_{k+1} - T_k$) и (12) ($T_k - T_{k-1}$) прямо пропор-

циональны изменению параметра износа за период времени эксплуатации на соответствующем шаге сетки, например:

$$\Delta n1 = n - n_{k+1}, \Delta n2 = n_{k+1} - n_k \text{ или} \\ \Delta n3 = n_k - n_{k-1}. \quad (13)$$

В этом случае можно сделать вывод, что уравнения (11) и (12) и показывают функцию $T(n)$, в данном случае, зависимость ресурса от величины запасов прочности на соответствующем шаге сетки (13), т. е. на различных отрезках жизненного цикла машины. Однако точное определение функции $T(n)$ осуществимо только при равномерном шаге сетки при условии, если определена функция $F(n_k, T_k)$. Прогнозирование ресурса, как известно из практики, проводится преимущественно с неравномерным шагом сетки $\Delta n1, \Delta n2$ и $\Delta n3$, поскольку процесс ТД затруднительно осуществлять регулярно через равные промежутки времени. Кроме того, графическая интерпретация показывает только закономерность перехода исходного состояния к предельному состоянию (см. рис. 1), но для построения кривой, отражающей истинное изменение ресурса при снижении запасов прочности, этого оказалось недостаточно. Применением метода прогноза и коррекции Адамса–Башфорта [17] возможно получение значения неизвестных для заданных временных интервалов, например, ΔT с переменным шагом, однако на практике это не всегда приемлемо для исследователя-прикладника. Количественную информацию затруднительно получить только решением уравнений (3) и (4). Необходим поиск зависимостей, применимых для расчета ресурса, и показываю-



щих закономерность его снижения на всем протяжении жизненного цикла машины.

Заметим, что в условиях постепенной выработки ресурса параметр износа может быть выражен некоторым конечным числом неотрицательных значений. Тогда для оценки ресурса необходим синтез полученных количественных результатов износа и других технических параметров машины, полученных путем анализа режимов эксплуатации, диагностирования, проведения ресурсно-прочностных исследований, что и требуется исследователю-прикладнику.

Как показывают уравнения (11) и (12) переход от исходного состояния к фактическому и далее к предельному согласно (13) происходит на соответствующем шаге сетки Δn_k и сопровождается снижением запасов прочности, запасов толщин стенок, запасов на износ пар трения и т. д. Несмотря на то, что все точки n_k и T_k принадлежат кривой $T(n)$ (см. рис. 1), эти величины являются фиксированными значениями исходного запаса n_u , текущего n_k и нормативного n_n на соответствующем отрезке времени как с равномерным, так и с неравномерным шагом сетки. На практике чаще наблюдается неравномерный шаг в результате проведения ТД по мере необходимости, поэтому износ по относительному снижению запасов на момент текущего ТД так же определяется с неравномерным шагом.

Практическая реализация закономерности снижения ресурса на основе представленной модели

Сделаем попытку получения приближенной зависимости ресурса, которая обеспечивала бы приемлемую для практики точность. Используем в уравнениях (13) для нахождения величин $\Delta n_1, \Delta n_2$ и Δn_3 исходные, текущие и прогнозируемые значения запасов прочности или запасов толщин стенок, определенных прочностными расчетами. Снижение параметров, выраженных через запасы прочности n за период T , принято в качестве показателя износа [18], который может быть определен разностью $\Delta n_i = n_i - n_n$. Дается определение главного параметра износа и допустимой совокупной степени износа, связанной с безопасностью машин, для которых характерен такой главный параметр, как, например, коррозионный, абразивный, усталостный износ и другие виды износа от воздействия высоких и низких температур и давлений химически активных сред, приводящих к деградации механических свойств материала [6]. Здесь же приводятся методы определения степени износа [6], который выражен

через коэффициенты физического износа и технического состояния машины [11].

Величину $\Delta n_i/n_n$, примем как допустимый совокупный износ. Разделив $\Delta n_i = n_i - n_n$ на n_n , получим степень износа за период ΔT , выраженную формулой

$$Z = f(\Delta T) = \frac{n_i - n_n}{n_n}.$$

Предположим, что за предыдущую эксплуатацию снижение запаса прочности выражено разностью $\Delta n_k = n_i - n_k$. тогда, как и в предыдущем случае степень износа за период T_{k+1} можно определить формулой

$$Z_{k+1} = f(T_{k+1}) = \frac{n_i - (n_k - n_n)}{n_k}.$$

Если предположить, что износ будет сопровождаться таким же снижением запаса прочности, то тогда закономерность его снижения может быть определена запасом износа на период T_{k-1} . В одной из анализируемых работ [12] принято отношение $n_k/\Delta n_k$ при последующем периоде эксплуатации T_{k-1} , которое названо коэффициентом безопасности [11], и в данном случае определяется формулой

$$K_{k-1} = f(T_{k-1}) = \frac{n_k}{n_i - n_k}. \quad (14)$$

Коэффициент безопасности показывает возможную степень износа на последующий период времени T_{k-1} .

Для оценки ресурса, как принято в работе [8], на данном этапе исследований рассмотрим формулу

$$T_k = t_3 \sqrt{\frac{n_k}{n_n - n_k}}. \quad (15)$$

Обсуждение результатов

Предположим, что $t_3 = 20$ лет принят за нормативный или определен по методике [11], исходный запас прочности задан величиной $n_n = 2,5$. Рассчитаем ресурс по формуле (15), покажем экспоненциальную зависимость ресурса при снижении запаса прочности от 2,5 до 0 (рис. 2) и увидим, на какую величину через интервалы времени снижается ресурс [18]. Из формулы (15) следует, что при значениях $n_i \cong n_k$ износ был бы близок к нулю, тогда исходный ресурс машины был бы ограничен 223 годами. Учитывая, что фактические запасы прочности ниже проектных $n_i < n_n$, например, вследствие выполнения толщин стенок по нижнему предельному отклонению или из-за погрешности измерения, а также других факторов, поэтому величина исходного ресурса будет ниже 223 лет. При $n_k = 2,4$ исходный ресурс составит $T_k = 98$ лет. При $n_k = 2,2$ он составит $T_k = 54$ года и т. д. В предположении, что до достижения $n_k = 1,5$ остаточный ресурс составит $T_k = 24$ года, то

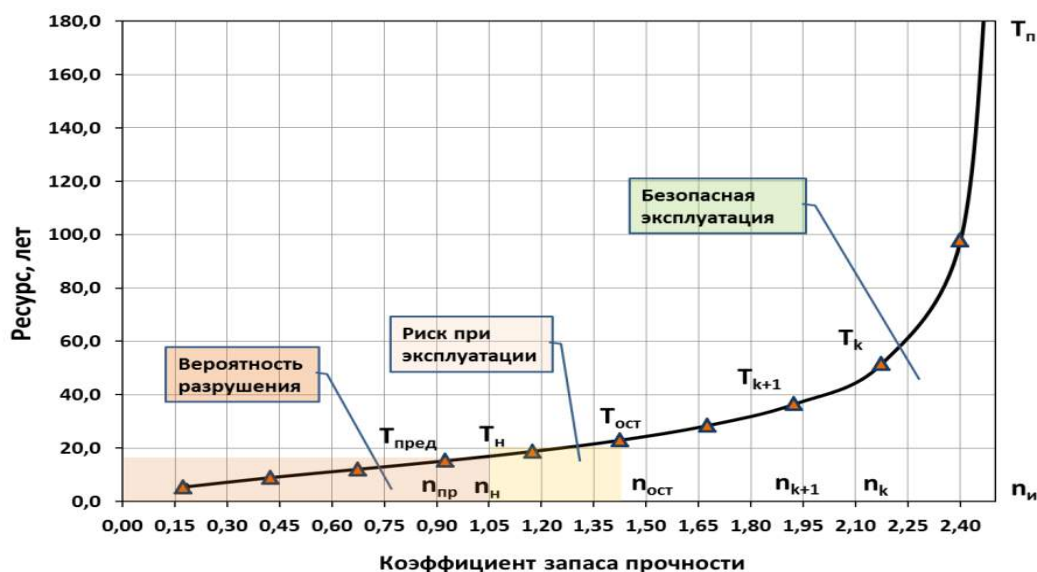


Рис. 2. Экспоненциальная зависимость снижения ресурса на различных отрезках жизненного цикла машины

безопасная эксплуатация возможна, при $n_k < 1,5$ для восстановления работоспособности машины необходимы компенсирующие мероприятия и повторное ТД. При $n_k = 1,0$ появляется риск разрушения. Допустима эксплуатация до достижения запаса прочности $n_k = 1,5$, ниже которого эксплуатация машины должна быть прекращена (рис. 2). Далее экспоненциальная зависимость показывает, если n_k близко к нулю, то и остаточный ресурс приблизится к нулевому значению.

Результат построения зависимости (см. рис. 2) подтверждает, что предложенная закономерность подобна графической интерпретации прогноза и коррекции (см. рис. 1), поэтому формула (15) применима для расчета ресурса на различных этапах жизненного цикла машин при условии, что погрешность расчетов не превышает 5 %.

Выводы

Математическое описание закономерности снижения ресурса и графическая интерпретация

прогноза и коррекции показывают, что между исходными показателями технического состояния (при изготовлении), фактическими (в настоящий момент времени) и прогнозируемыми показателями, которые вероятно наступят при последующем периоде эксплуатации.

С помощью предложенной модели прогнозирования ресурса учитывается наибольшее количество факторов, влияющих на ресурс и прочность элементов машины.

Экспоненциальная зависимость показывает закономерность снижения ресурса по степени износа, дефектов, степени опасности, появляющейся при достижении предельного состояния машины.

С применением предложенной закономерности изменения технического состояния возможно прогнозирование проектного, исходного, текущего и остаточного ресурса, что является одной из мер по снижению рисков эксплуатации на протяжении всего жизненного цикла машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РД 50-423-83. Методические указания. Надежность в технике. Методика прогнозирования остаточного ресурса машин и деталей, подверженных изнашиванию.
2. ГОСТ 21571-76. Система технического обслуживания и ремонта техники. Методы определения допустимого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин.
3. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: «Машиностроение», 1984. –312 с.
4. ANSI SQL Standart. The 1992 ISO–ANSI SQL standart is available through ANSI as document X3.135–1992 and through ISO as document ISO/EC 9075:1992.
5. Тришин В. Н., Шатров М.В. Основные задачи и технические решения, реализованные в компьютерной системе помощи оценщику и аудитору ASIS. Имущественные отношения в Российской Федерации. - 2004. - №11. <http://www.okr-okp.ru/> (дата обращения: 28.10.2010).
6. Лейфер Л.А., Кашникова П.М., Определение остаточного срока службы машин и оборудования на основе вероятностных моделей: http://www.labrate.ru/leifer/leifer_kashnikova_article_2007_residual_service_life.htm (дата обращения: 05.10.2007).
7. Митрофанов А.В. и Киченко С.Б. Расчет гамма процентного ресурса сосудов и резервуаров // Безопасность труда в промышленности. - 2000. -№ 9. – С. 28–33.
8. Махутов Н.А., Пимштейн П.Г. // «Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Вып. 5.» – М., 1995. 16 с.



9. РД 03–421–01. Методические указания по проведению технического диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. – М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2002. – 136 с.
10. Красных Б.А., Мокроусов С.Н., Махутов Н.А., Митрофанов А.В., Барышов С.Н. Ограничение прогнозируемого ресурса и назначаемого срока безопасной эксплуатации оборудования нефтегазового комплекса // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 30–33.
11. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.
12. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов / Под общ. ред. Махутова Н.А. – М.: МГОФ «Знание», 2015, - 600 с.
13. Электронный ресурс: Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, page 942 «...multistep... Predictor–corrector is a particular subcategory of these methods – in fact, the most widely used». <http://www.nsc.ru/rus/textbooks/akhmerov/nm-ode/1-3.html> / (Дата обращения 15.07.2012).
14. Электронный ресурс: <http://www.nsc.ru/rus/textbooks/akhmerov/nm-ode/1-3.html> «1.3.2. Схема Хойна, или предиктор–корректор.» / (дата обращения: 19 июля 2012 г.).
15. Электронный ресурс: <http://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 19 июля 2012 г.)
16. Электронный ресурс: Chen, Wenfang.; Kee, Daniel D. (2003), Advanced Mathematics for Engineering and Science, MA, USA: World Scientific, ISBN981–238–292–5, <http://www.keldysh.ru/comma/html/ode/rk.html/> (дата обращения: 16.07.2012 г.).
17. Электронный ресурс: <http://www.physchem.chimfak.rsu.ru/Source/NumMethods/ODE.html/> (дата обращения: 07.09.2011).
18. Cherepanov A., Lyapustin P. Forecasting Resource as a Method of Increasing the Security // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 253 012004. 2017.

REFERENCES

1. RD 50-423-83. Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metodika prognozirovaniya ostatochnogo resursa mashin i detalei, podverzhennykh iznashivaniyu [Methodical instructions. Reliability in technology. The methodology for predicting the residual life of machines and parts subject to wear].
2. GOST 21571-76. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhniki. Metody opredeleniya dopuskaemogo otkloneniya parametra tekhnicheskogo sostoyaniya i prognozirovaniya ostatochnogo resursa sostavnykh chastei agregatov mashin [System maintenance and repair of equipment. Methods for determining the permissible deviation of the technical condition parameter and predicting the residual life of component parts of machine assemblies.].
3. Bolotin V.V. Prognozirovaniye resursa mashin i konstruksii [Prediction of the resource of machines and structures]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1984. 312 p.
4. ANSI SQL Standard. The 1992 ISO–ANSI SQL standard is available through ANSI as document X3.135–1992 and through ISO as document ISO/EC 9075:1992.
5. Trishin V. N., Shatrov M.V. Osnovnye zadachi i tekhnicheskie resheniya, realizovannyye v komp'yuternoii sisteme pomoshchi otsenshchiku i auditoru ASIS [The main tasks and technical solutions implemented in the computer system help the ASIS evaluator and auditor]. Imushchestvennyye otnosheniya v Rossiiskoi Federatsii [Property relations in the Russian Federation], 2004. No.11. URL: <http://www.okp-okp.ru/> (access date: Oct 28, 2010).
6. Leifer L.A., Kashnikova P.M., Opredeleniye ostatochnogo sroka sluzhby mashin i oborudovaniya na osnove veroyatnostnykh modelei [An electronic medium]: http://www.labrate.ru/leifer/leifer_kashnikova_article_2007_residual_service_life.htm (access date: Oct 05, 2007).
7. Mitrofanov A.V., Kichenko S.B. Raschet gamma protsentnogo resursa sosudov i rezervuarov [Calculation of the gamma of the percentage resource of vessels and reservoirs]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Occupational safety in industry], 2000. No. 9. Pp. 28–33.
8. Makhutov N.A., Pimshtein P.G. Problemy bezopasnosti pri chrezvychainykh situatsiyakh [Safety issues in emergency situations]. Issue 5. Moscow, 1995. 16 p.
9. РД 03–421–01. Методические указания по проведению технического диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов [RD 03–421–01. Guidelines for the technical diagnosis of the technical condition and the determination of the residual life of vessels and apparatuses]. Moscow: SUE SRC Promyshlennaya bezopasnost' Publ., 2002. 136 p.
10. Krasnykh B.A., Mokrousov S.N., Makhutov N.A., Mitrofanov A.V., Baryshov S.N. Ogranicheniye prognozirovannogo resursa i naznachaemogo sroka bezopasnoi ekspluatatsii oborudovaniya neftegazovogo kompleksa [Limitation of the predicted resource and the appointed term for the safe operation of the equipment of the oil and gas complex]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Occupational safety in industry], 2008. No. 6. Pp. 30–33.
11. Makhutov N.A. Konstruksionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost': V 2 ch. [Structural strength, resource and technological safety: In 2 parts]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2005. Part 2: Obosnovaniye resursa i bezopasnosti [Part 2: Justification of the resource and security]. 610 p.
12. Bezopasnost' Rossii. Pravovyye, sotsial'no-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Upravleniye resursom ekspluatatsii vysokoriskovykh ob"ektov [Security of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Resource management of high-risk facilities]. In Makhutov N.A. (gen. ed.). Moscow: IHPF Znanie, 2015, 600 p.
13. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, page 942 «...multistep... Predictor–corrector is a particular subcategory of these methods – in fact, the most widely used» [An electronic medium]. URL: <http://www.nsc.ru/rus/textbooks/akhmerov/nm-ode/1-3.html> (access date: Jul 15, 2012).
14. Hoynе's scheme, or a predictor-corrector [An electronic medium]. URL: <http://www.nsc.ru/rus/textbooks/akhmerov/nm-ode/1-3.html> (access date: Jul 19, 2012).
15. Wikipedia. The free encyclopedia [An electronic medium]. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/> (access date: Jul 19, 2012).
16. Chen W., Kee D. Advanced Mathematics for Engineering and Science, MA, USA: World Scientific, 2003, ISBN981–238–292–5 [An electronic medium]. URL: <http://www.keldysh.ru/comma/html/ode/rk.html/> (access date: Jul 16, 2012).



17. SFU (RSU) Department of Physical Chemistry. Numerical methods and programming. Materials for the lecture course. [An electronic medium]. URL: <http://www.physchem.chimfak.rsu.ru/Source/NumMethods/ODE.html/> (access date: Sept 07, 2011).

18. Cherepanov A., Lyapustin P. Forecasting Resource as a Method of Increasing the Security. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 253 012004. 2017.

Информация об авторах

Черепанов Анатолий Петрович – д. т. н., профессор кафедры «Управление на автомобильном транспорте», Ангарский государственный технический университет, e-mail: boning89@mail.ru

Ляпустин Павел Константинович – к. т. н., заведующий кафедрой «Управление на автомобильном транспорте», Ангарский государственный технический университет, e-mail: lpk62@mail.ru

Authors

Anatolii Petrovich Cherepanov – Doctor of Engineering Science, Prof. at the Subdepartment of Management of Road Transport, Angarsk State Technical University, e-mail: boning89@mail.ru

Pavel Konstantinovich Lyapustin – Ph.D. in Engineering Science, head of the Subdepartment of Management of Road Transport, Angarsk State Technical University, e-mail: lpk62@mail.ru

Для цитирования

Черепанов А. П. Закономерности снижения ресурса уникальных машин / А. П. Черепанов, П. К. Ляпустин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 37–45. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).37–45

For citation

Cherepanov A. P., Lyapustin P. K. Zakonomernosti snizheniya resursa unikal'nykh mashin [The pattern of decrease of a resource of unique machines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 37–45. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).37–45

УДК 62.752, 621:534;833; 888.6, 629.4.015;02

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).45–52

С. В. Елисеев¹, Н. К. Кузнецов², Р. С. Большаков¹, А. И. Артюнин¹

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 04 апреля 2019 г.

ДИНАМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ МАШИНЫ: УЗЛЫ КОЛЕБАНИЙ, ЦЕНТРЫ ЖЕСТКОСТИ, КОЭФФИЦИЕНТЫ СВЯЗНОСТИ

Аннотация. В статье развиваются методологические основы структурного математического моделирования в приложении к задачам формирования динамических состояний рабочих органов технологических вибрационных машин. Цель исследования заключается в разработке метода построения математических моделей для оценки динамических состояний рабочих органов вибрационных машин в условиях изменения места приложения возмущающих воздействий. Используются структурные математические модели в виде структурных схем эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления. Показаны возможности оценки и формирования динамических состояний или распределения амплитуд колебаний рабочих органов на основе использования передаточных функций системы, в частности, передаточных функций межпарциальных связей. Вводится ряд понятий, отображающих особенности возможных связей между параметрами движения точек рабочего органа и параметрами соотношения возбуждающих силовых факторов. Показано, что положение узлов колебаний и другие характерные особенности динамических состояний можно корректировать и формировать, изменяя значения коэффициентов связности движений между координатами точек, а также параметрами совместно действующих вибрационных возбуждений. Получены аналитические соотношения, определяющие условия возникновения и реализации различных динамических режимов, связанных с рассмотрением узлов колебаний и центров жесткости. Авторами предложено ввести понятие о передаточной функции межпарциальной связи как некоторой интегрированной составляющей, позволяющей производить комплексную оценку различных динамических режимов при действии нескольких возмущающих факторов и обладающей возможностями детализации представлений о параметрах взаимного расположения характерных точек.

Ключевые слова: передаточная функция, коэффициент связности внешних воздействий, динамическое состояние, межпарциальные связи, узлы колебаний, распределение амплитуд, колебания точек рабочего органа.

S. V. Eliseev¹, N. K. Kuznetsov², R. S. Bol'shakov¹, A. I. Artyunin¹

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: April 04, 2019