

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-3>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/39TVN316.pdf>

Статья опубликована 09.06.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Мартышкин А.П., Маскайкина С.Е., Полуешина Н.И., Веснушкина Н.Н. Анализ методов оптимизации допускаемых отклонений параметров элементов машин и разработка методики их установления с заданной вероятностью безотказной наработки // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/39TVN316.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.797:629.114.41

Мартышкин Анатолий Петрович

ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет»
Рузаевский институт машиностроения (филиал), Россия, Рузаевка¹
Доцент кафедры «Общетехнических дисциплин»
Кандидат технических наук
E-mail: A-martyshkin@yandex.ru

Маскайкина Светлана Егоровна

ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет»
Рузаевский институт машиностроения (филиал), Россия, Рузаевка
Доцент кафедры «Металлообрабатывающих станков и комплексов»
E-mail: rimstanok@mail.ru

Полуешина Наталья Ивановна

ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет»
Рузаевский институт машиностроения (филиал), Россия, Рузаевка
Доцент кафедры «Металлообрабатывающих станков и комплексов»
E-mail: rimstanok@mail.ru

Веснушкина Нина Николаевна

ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет»
Рузаевский институт машиностроения (филиал), Россия, Рузаевка
Доцент кафедры «Технологии машиностроения»
E-mail: nina.vesnushkina@mail.ru

**Анализ методов оптимизации допускаемых отклонений
параметров элементов машин и разработка методики
их установления с заданной вероятностью
безотказной наработки**

Аннотация. При решении задач повышения надёжности машин и технологического оборудования, в очередном межремонтном периоде, существует проблема назначения при ремонте допускаемых отклонений и значений параметров их составных частей (элементов). Принимаемые значения данных параметров должны обеспечивать остаточный ресурс элементов, соответствующий межремонтному ресурсу машины или сборочной единицы.

¹ 431440, Республика Мордовия, г. Рузаевка, ул. Ленина, д. 93

Однако рекомендуемые и применяемые в настоящее время методики определения допускаемых отклонений параметров не лишены недостатков, а, следовательно, существует необходимость их совершенствования и уточнения. Анализ научных работ в данной области показал, что отсутствуют рекомендации по определению допускаемых отклонений параметров с задаваемой вероятностью безотказной наработки элементов и уточнению результатов с учетом показателей вариации фактических отклонений параметров от теоретических реализаций, зависящих от эксплуатационных условий работы машин и их составных частей.

В результате исследований, на основе моделирования динамики параметров элементов машин и схемы формирования допускаемых отклонений параметров с использованием нижней доверительной границы рассеивания ресурса элемента, разработана методика и получены общие зависимости для определения допускаемых отклонений параметров элементов машин, обеспечивающих задаваемую вероятность их безотказности в очередном межремонтном периоде. Полученные формулы отличаются сравнительной простотой и возможностью их оперативного применения в практике ремонтного производства.

Ключевые слова: допускаемый; отклонение; параметр; элемент; машина; наработка; безотказность; анализ; износ; ремонт; ресурс; критерий; зависимость; вероятность; отказ; показатель; вариация; предельный

Введение

Под оптимальным допускаемым параметром понимают граничное значение, обеспечивающее максимальную эффективность эксплуатации и ремонта и назначаемое по выбранному критерию. Допускаемые отклонения параметров зависят от их предельных значений и служат мерой определения исправности составных частей машины. Они представляют управляющие параметры, влияющие на вероятность безотказной работы, долговечность, расход запасных частей, периодичность ремонта.

В качестве критериев эффективности при установлении допускаемого отклонения параметра используют минимальные суммарные издержки на плановые ремонты машин по состоянию и на устранение последствий отказов в межремонтном периоде, с учётом потерь от простоев, или обеспечение максимальной вероятности безотказной работы при минимальных суммарных удельных издержках.

Методы определения допускаемых отклонений и значений параметров постоянно совершенствуются в связи с развитием науки и техники, а также изменением требований потребителей.

Методы оптимизации допускаемых отклонений параметров элементов машин

Научной разработке системы допускаемых и предельных параметров элементов (износов деталей, зазоров и натягов соединений и др.) в области машиностроения, автотракторной и сельскохозяйственной техники посвящено значительное число исследований [1-33] и др.

Первые научные методики расчета допускаемых износов деталей разрабатывались на основе закономерностей их изнашивания. Недостаток их заключался в том, что задача решалась в рамках детерминированной модели изнашивания.

Широкое распространение в своё время получили методики, предложенные в работах [1-3], где закономерность изнашивания определяется на основе эксплуатационных наблюдений.

Допускаемый при ремонте износ деталей рассчитывался по формуле:

$$U_{\text{доп}} = U_{\text{max}} - \gamma T_I, \quad (1)$$

где: U_{max} – предельный износ детали;

T_I – время между двумя плановыми ремонтами (межремонтная наработка);

γ – скорость изнашивания.

С учётом того, что $\gamma = \frac{U_{\text{доп}}}{T}$, где T – срок службы детали, формула (1) применялась в виде:

$$U_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{max}}}{1 + \frac{T_I}{T}}. \quad (2)$$

Таким образом в формуле (2) учитывается периодичность ремонта.

В работе [2] межремонтный ресурс устанавливается по среднему ресурсу наиболее быстроизнашивающейся детали (например: для двигателя – по гильзе цилиндров). При этом делалось допущение о прямолинейном характере изнашивания, а величина износа в процессе приработки бралась равной допуску на размер новой детали. При анализе опытных данных определялись средние и модальные (наиболее вероятные) значения износостойкости. В методике установлена общая зависимость между средней и модальной износостойкостью.

Аналогичным образом определяются и допускаемые зазоры сопряжений.

Простота и четкость предложенных методик способствовали широкому их применению для различных технических систем. Однако они имели и определённые недостатки, а именно, не учитывали экономическую эффективность устанавливаемых допусков на износ безотказность элементов в межремонтном периоде, а также показатели вариации скорости изнашивания. Кроме этого, при расчете принималась в основном прямолинейная зависимость износа детали (сопряжения), что далеко не всегда соответствует действительности.

Стремление учесть в расчетах затраты на обслуживание и ремонт наряду с безотказностью элементов, требовало вероятностного подхода к решению задачи определения допускаемых износов.

В работе [4] закономерность изменения параметра предлагается аппроксимировать случайной степенной функцией вида:

$$U'(t) = V_c t^\alpha + Z + U_1, \quad (3)$$

$$U(t) = V_c t^\alpha + Z, \quad U(t) = U'(t) - U_1,$$

где: $V_c t^\alpha$ – элементарная случайная степенная функция;

Z – случайное отклонение фактического изменения параметра от плавной теоретической реализации, ед. параметра;

U_1 - показатель, характеризующий приработку деталей, ед. параметра;

t - наработка или срок службы изделия, ед. наработки;

α - показатель степени функции изменения параметра;

V_c - случайная величина скорости изменения параметра, ед. изм. параметра/ед. наработки ^{α} .

С помощью данной функции можно достаточно точно описать процесс изменения параметра.

Рассмотрим некоторые, наиболее представляющие интерес с нашей точки зрения методики, для определения допускаемых значений параметров элементов машин, разработанные в последующих трудах некоторых ученых и рекомендованных к практическому применению.

Метод оптимизации, основанный на использовании критерия минимальных суммарных удельных вероятных издержек, связанных с устранением последствий отказов в эксплуатации и предупредительной заменой (восстановлением) элементов, фундаментально разработан в источнике [4] и развит в работах [5-7]. В своё время он был рекомендован как основной для определения допускаемых отклонений параметров технического состояния при разработке нормативно-технической документации на техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт, а также прогнозирование остаточного ресурса составных частей машин.

Базовая целевая функция допускаемого отклонения параметра состояния элемента имеет вид:

$$G = \min_{0 \leq D \leq u_n} \left\{ \frac{AQ(D)}{T_c(D)} + \frac{C[1-Q(D)]}{T_c(D)} \right\}, \quad (4)$$

где: $Q(D)$ - вероятность отказа элемента за срок его службы в зависимости от допускаемого отклонения параметра;

$T_c(D)$ - фактически используемый ресурс элемента по параметру в зависимости от D , ед. наработки;

A, C - средние дискретные издержки, связанные с устранением последствий отказа и предупредительной заменой (восстановлением) элемента по параметру, руб.

Издержки A включают в себя издержки C , в которые в свою очередь входят издержки на диагностирование элемента. Они отличаются от C издержками на дополнительные ремонтные работы и потерями от простоя машины при устранении последствий отказа в эксплуатационных условиях.

Последующее совершенствование целевой функции (4) связано с учетом влияния периодичности контроля (ремонта) t_m , погрешности измерения параметра σ , непрерывных издержек S , возникающих в эксплуатации, вероятности устранения последствий отказа за период эксплуатации и других факторов. В результате выражение принимает вид:

$$G(D, t_m, \sigma) = \min_{0 \leq D \leq u_n} \left\{ \frac{AQ_y(D, t_m, \sigma) + C[1 - Q_y(D, t_m, \sigma)] + BK_n(D, t_m, \sigma) + S(D, t_m, \sigma)}{T_B(D, t_m, \sigma)} \right\}, \quad (5)$$

где: B - средние издержки на диагностирование параметра, руб.;

K_n - число проверок за период эксплуатации при данных D и t_m ;

t_m - межремонтная наработка, ед. наработки;

$T_в$ - средняя наработка до фактического восстановления элемента, ед. наработки.

Вероятность устранения последствий отказа $Q(D, t_m, \sigma)$ введена в связи с возможным несовпадением моментов наступления отказа и его устранения, когда явные признаки отказа отсутствуют. Непрерывные издержки $S(D, t_m, \sigma)$ связаны с ухудшением функционирования машины или агрегата при изменении параметра состояния.

Аргументы $Q(D, t_m, \sigma)$ и $T_в(D, t_m, \sigma)$ целевой функции находят используя показатели динамики параметров состояния, выражаемые зависимостью изменения параметра (3). Для их расчёта были разработаны специальные методики.

Однако следует отметить, что получаемые значения допускаемых отклонений являлись оптимальными для определённой статистической совокупности элементов и составных частей в целом. Если же рассматривать отдельные реализации этой совокупности, то для составных частей, элементы которых изнашиваются со скоростью больше средней, будет наблюдаться повышенное число отказов, а для составных частей, элементы которых изнашиваются с меньшей скоростью – недоиспользование ресурса.

В работе [5] предложена целевая функция, учитывающая потери от недоиспользования ресурса (остаточную стоимость составной части) при предупредительной замене детали. Данная функция имеет вид:

$$L(T_p, T_d) = \frac{A \left[\int_0^{T_p} f(t) dt - \int_{T_p+T_d}^{\infty} f(t) dt \right] + B \int_{T_p}^{T_p+T_d} f(t) dt + C \left[\int_{T_p}^{T_p+T_d} f(t) dt - T_p \int_{T_p}^{T_p+T_d} f(t) dt \right]}{\int_0^{T_p} f(t) dt + T_p \int_{T_p}^{\infty} f(t) dt} ; \quad (6)$$

где: T_p – достигнутая наработка;

T_d – остаточный ресурс детали;

A – затраты на устранение последствий отказа детали с учётом потерь от простоя машины;

B – затраты на проведение профилактической замены;

C – удельная стоимость детали.

В выражении (6) первое слагаемое числителя учитывает затраты на устранение последствий отказов, второе – на профилактическую замену деталей, имеющих в момент достигнутой наработки остаточный ресурс меньше допускаемого, третье – потери от недоиспользования ресурса профилактически заменяемых деталей. Решение проводится численными методами.

После получения оптимальных значений T_p и T_d осуществляется переход к оптимальному допустимому параметру, используя представление процесса изнашивания известной функцией $V_c t^\alpha$. Для этого предлагается формула:

$$U_d = U_{np} \frac{\varphi(T_p)}{\varphi(T_p + T_d)}, \quad (7)$$

где: U_{np} - предельное значение параметра, при достижении которого наступает отказ;

$\varphi(T_p)$, $\varphi(T_p + T_\delta)$ - значения функции изменения параметра.

Однако получаемые по формуле (7) допускаемые отклонения параметров оптимальны для статистической совокупности элементов в целом и не всегда оптимальны при рассмотрении отдельных реализаций. Данное положение связано как со случайной скоростью изменения параметра, так и с наличием случайных внутренних (конструктивных) и внешних (эксплуатационных) факторов, оказывающих влияние на динамику параметра.

В работах [6, 7] для определения допускаемого при капитальном ремонте зазора в сопряжениях предлагается формула:

$$D_n = u_0 + \frac{P_n - u_0}{(1 + K)^\alpha} = u_0 + \Delta D_n, \quad (8)$$

где: u_0 - максимальный в пределах допуска начальный зазор;

P_n - предельный зазор;

$K = T_2 / T_1$ - степень восстановления ресурса машины;

T_1, T_2 - доремонтный и межремонтный ресурсы;

α - показатель интенсивности изнашивания сопряжения;

ΔD_n - допускаемый износ сопряжения;

Формула (8) получена в предположении двух межремонтных интервалов и отличается сравнительной простотой. Если же ресурс элемента может обеспечить работу машины в большем количестве интервалов t_m то применение формулы приводит к недоиспользованию его ресурса.

В литературе [4-7] даются зависимости, разработанные для прогнозирования среднего остаточного ресурса и остаточного ресурса с задаваемой доверительной вероятностью. При этом учитывается распределение случайной величины Z , представленной в выражении (3) и характеризующей изменения в отклонении параметра вследствие влияния внешних эксплуатационных факторов. Однако отсутствуют формулы для определения предельных и допускаемых параметров элементов с учетом распределения $f(Z)$ и с задаваемой вероятностью безотказности.

В работе [8] предлагается метод оптимизации допускаемых при ремонте значений обобщённых диагностических параметров, отличающийся предварительным определением априорных вероятностей принятия решений. При решении задачи используется критерий среднего удельного минимального суммарного риска и учитываются априорные вероятности принятия решений и ошибки первого и второго рода при диагностировании, заключающиеся в выбраковке исправного и пропуске неисправного элемента. Целевая функция построена на базе выражения (5).

Отметим, что методика разработана для оптимизации допускаемых при капитальном ремонте значений обобщённых диагностических параметров машин и составных частей, диагностируемых по косвенным признакам, а задача оптимизации допускаемых значений структурных параметров элементов при этом не решается.

Дальнейшее совершенствование определения допускаемых отклонений параметров представлено и развито в работах [9-12]. В данных исследованиях предлагается методика, основанная на использовании не одного, а нескольких различных допускаемых отклонений параметров. Представлены формулы для определения нескольких допускаемых износов для

новых и заменённых деталей. При этом учитывается плотность распределения ресурса заменённых деталей и другие особенности процесса изнашивания. При степенной гладкой функции допускаемый износ рекомендуется определять перед каждым i -м периодом работы по формуле:

$$D_i = \left(\frac{i \cdot t_M - t_M}{i \cdot t_M} \right)^\alpha \cdot U_p; \quad (9)$$

где: i - номер межконтрольного (межремонтного) периода;

t_M - его величина в единицах наработки;

α - показатель степени изнашивания;

U_p - предельный износ.

Из формулы явствует, что в каждом последующем межремонтном периоде значение D_i увеличивается.

В случае негладкой функции изнашивания отклонение параметра аппроксимируется двумя функциями: гладкой, в виде математического ожидания и функцией отклонения от матожидания $z(u)$, которую выражают среднеквадратическим отклонением σ_u , умноженным на квантиль B :

$$D_i^p = \left(\frac{i \cdot t_M - t_M}{i \cdot t_M} \right)^\alpha \cdot U_p \pm B \cdot \sigma_u. \quad (10)$$

Данная методика даёт возможность определять допускаемые износы как для новых, так и для заменяемых деталей в очередном межремонтном периоде, в том числе с заданной доверительной вероятностью, так как последняя зависимость учитывает случайное отклонение z фактического изменения параметра от плавной (гладкой) теоретической реализации.

Разработанная методика с применением формул (9) и (10) устраняет ошибку предшествующих методов оптимизации одного допускаемого отклонения по критерию минимума издержек, связанных с устранением последствий отказа и простоем машины, или критерию максимальной безотказности, изложенных в работах [4, 5]. Однако в исследованиях не учитывается, что предельное отклонение параметра U_p может быть случайной величиной, а предлагаемые формулы не позволяют определять допускаемые значения износов, обеспечивающих установленную или задаваемую безотказную наработку деталей.

Работы [13-33] посвящены развитию, дополнению и совершенствованию методик, а также распространению их на различные технические объекты. В данных исследованиях, имеющих как теоретический, так и прикладной характер, так же учитывается динамика отклонения параметра и другие факторы. Исследования проводились применительно к различным видам технологических систем и оборудования, а также для оптимизации параметров и показателей различных технологических процессов, реализуемых на них. Здесь можно отметить, что дополнения и совершенствования часто приводили к усложнению данной задачи, что далеко не всегда способствовало её рациональному и правильному решению.

Таким образом, анализ известных научных работ позволил установить, что основными критериями оптимизации допускаемых значений параметров являются технические, технико-экономические и экономические. Целевые функции и формулы учитывают характеристики динамики параметров элементов, зависящих от наработки и периодичность ремонтов.

Известно, что динамика параметров широко варьируется в связи с нестабильностью внутренних возмущающих факторов и вероятностным характером влияния внешних условий эксплуатации машин. Кроме того, часто наблюдается вероятностный характер связи между предельным отклонением параметра элемента машины и его отказом. При этом отсутствуют рекомендации по определению допускаемых отклонений параметров с учетом вероятности безотказности элементов и уточнению результатов в зависимости от эксплуатационных условий работы машин и их составных частей, а также с учётом требований потребителя.

Исходя из вышеизложенного вытекает необходимость углубления анализа, развития и дополнения методик с целью уточнения допускаемых и предельных параметров элементов машин.

Разработка методики определения допускаемых отклонений параметров элементов, обеспечивающих установленную безотказную наработку

Рассмотрим определение допускаемого отклонения параметра, обуславливающего безотказную наработку элемента в очередном межремонтном периоде с заданной вероятностью.

Применение подходов, изложенных в работах [1-34] и упрощённой схемы динамики параметра, изображенной на рисунке 1, позволяет вывести формулы для определения величин допускаемых отклонений параметров, обеспечивающих установленную безотказную наработку.

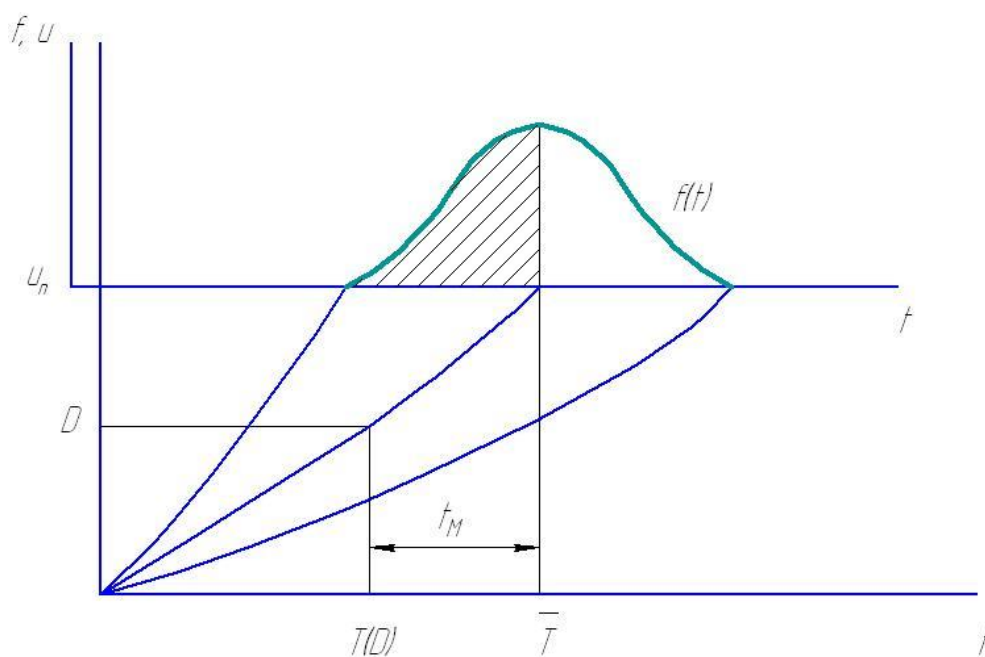


Рисунок 1. Динамика параметра элемента (разработано авторами)

Если предельное отклонение параметра элемента U_n выразить через его средний ресурс \bar{T} посредством элементарной функции следующим образом:

$$U_n = V_c \bar{T}^\alpha, \quad (11)$$

Тогда с учётом схемы рис. 1 выражение для допускаемого отклонения параметра D запишется в виде:

$$D = V_c (\bar{T} - t_m)^\alpha = V_c [\bar{T}(D)]^\alpha \quad (12)$$

где t_m - межремонтный ресурс.

Используем нормирование допускаемого отклонения параметра D в долях предельного U_n , а среднего ресурса элемента \bar{T} в долях межремонтной наработки t_m :

$$\frac{D}{U_n} = D_0, \quad \frac{\bar{T}}{t_m} = T_0 \quad (13)$$

где: D_0 - нормированное допускаемое отклонение параметра;

T_0 - Нормированный средний ресурс.

После некоторых преобразований, с учётом (11), (12) и (13), получим следующее выражение для определения нормированной величины допускаемого отклонения параметра:

$$D_0 = \left(1 - \frac{1}{T_0}\right)^\alpha \quad (14)$$

При известных параметрах закона распределения ресурса и принятой доверительной вероятности, можно вычислить доверительные границы возможного рассеивания ресурса. Нижняя доверительная граница рассеивания ресурса $T(\gamma)$ при односторонней доверительной вероятности γ для закона нормального распределения (ЗНР) определяется по формуле:

$$T(\gamma) = \bar{T} - H_k(\gamma)\sigma, \quad (15)$$

а для закона распределения Вейбулла (ЗРВ) – по формуле:

$$T(\gamma) = H_k^B(1-\gamma)a + t_{cm}, \quad (16)$$

где: σ - среднеквадратическое отклонение;

H_k, H_k^B - квантили соответственно ЗНР и ЗРВ;

a - параметр ЗРВ;

t_{cm} - величина смещения начала рассеивания (для ЗРВ).

Использование выражений (14), (15) и (16), а также схемы, изображенной на рис. 2, обуславливает вывод зависимостей для определения допускаемого отклонения параметра с задаваемой вероятностью безотказности.

Выразив в формуле (15) среднеквадратическое отклонение σ через показатель вариации ресурса ν , получим выражение:

$$T(\gamma) = \bar{T}[1 - H_k(\gamma)\nu] \quad (17)$$

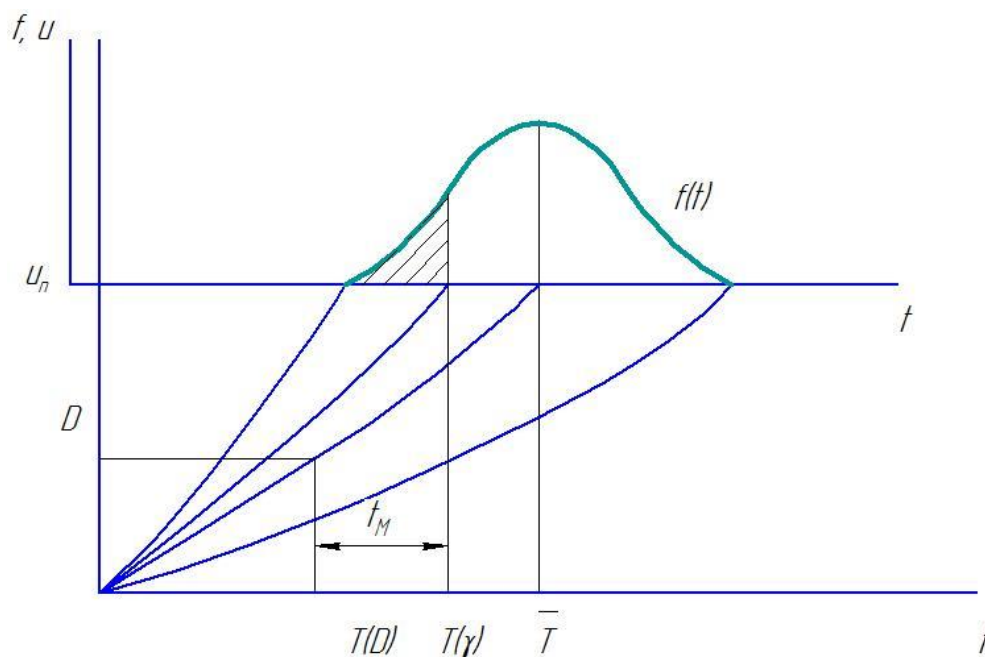


Рисунок 2. Схема формирования D с использованием нижней доверительной границы рассеивания ресурса элемента (разработано авторами)

Применяя нормирование:

$$\frac{T(\gamma)}{\bar{T}} = T_0(\gamma), \quad (18)$$

получаем зависимость для определения нормированного допускаемого отклонения параметра элемента, когда распределение его ресурса подчиняется ЗНР:

$$D_0 = \left[1 - \frac{1}{T_0 T_0(\gamma)} \right]^a. \quad (19)$$

Учтём, что для ЗРВ:

$$\sigma = \nu(T - t_{cm}), \quad a = \frac{\sigma}{C_\sigma}, \quad (20)$$

где C_σ - параметр ЗРВ.

Тогда с учётом (20) выражение (16) приводится к следующему виду:

$$T(\gamma) = H_k^\sigma (1 - \gamma) \frac{\nu}{C_B} \bar{T} - H_k^\sigma (1 - \gamma) \frac{\nu}{C_B} t_{cm} + t_{cm}. \quad (21)$$

Используя нормирование (18) и приняв:

$$\frac{t_{cm}}{t_M} = t_0 \quad (22)$$

получаем зависимость для определения нормированного допускаемого отклонения параметра элемента, когда распределение его ресурса подчиняется ЗРВ:

$$D_0 = \left[1 - \frac{1}{T_0 T_0(\gamma) - T_0(\gamma) t_0 + t_0} \right]^\alpha \quad (23)$$

Формулы (19) и (23) позволяют определить нормированные значения допускаемых отклонений параметров, обеспечивающих наработку элементов с задаваемой вероятностью безотказности при различных показателях вариации ресурса элементов.

Абсолютная величина допускаемого значения параметра определяется

$$D_D = |P_n \pm (D + \Delta P)|, \quad (24)$$

где: P_n - начальный зазор;

ΔP - показатель приработки.

Знак «+» применяется, когда параметр элемента с течением времени увеличивается, а знак «-» - когда параметр уменьшается.

Некоторые нормированные значения нижних доверительных границ рассеивания ресурса $T_0(\gamma)$ при различных величинах доверительной вероятности γ и показателей вариации ресурса ν представлены в таблице 1. Закономерности $T_0(\gamma, \nu)$ для различных значений γ показаны на рис. 3.

Таблица 1

Значения $T_0(\gamma)$ в зависимости от заданной вероятности безотказности γ и показателя вариации ресурса ν (величина смещения начала рассеивания при ЗРВ $t_{cm} = 0$) (составлена авторами)

γ	Показатель вариации ν				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,60	0,975	0,949	0,924	0,877	0,824
0,70	0,948	0,895	0,843	0,766	0,691
0,80	0,916	0,832	0,747	0,647	0,553
0,85	0,896	0,793	0,689	0,590	0,497
0,90	0,872	0,744	0,615	0,489	0,395
0,95	0,836	0,672	0,507	0,376	0,280
0,99	0,767	0,535	0,302	0,207	0,126

γ	Показатель вариации ν				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,60	0,573	0,694	0,630	0,564	0,510
0,70	0,618	0,540	0,468	0,403	0,360
0,80	0,472	0,391	0,328	0,270	0,220
0,85	0,404	0,325	0,258	0,196	0,170
0,90	0,303	0,231	0,178	0,134	0,110
0,95	0,191	0,143	0,097	0,072	0,050
0,99	0,079	0,050	0,027	0,021	0,010

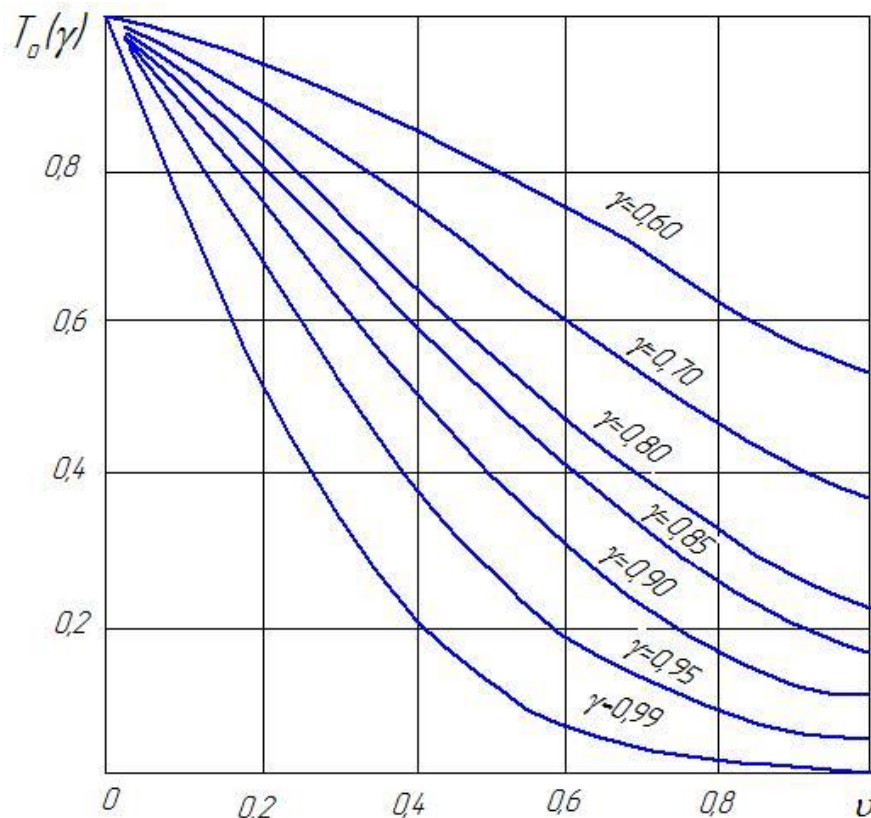


Рисунок 3. Графики зависимости $T_0(\gamma, \nu)$ при различных значениях вероятности безотказности γ (составлено авторами)

Методика расчёта и пример определения допускаемых отклонений и значений параметров с заданной вероятностью безотказной наработки

Например, требуется определить величину допускаемого параметра известного сопряжения (осевого зазора в сопряжении «корпус насоса – нагнетающие шестерни») для масляного насоса, обеспечивающего безотказную наработку в очередном межремонтном периоде машины с вероятностью $\gamma = 0,90$.

Для этого должны быть известны: закон распределения ресурса элемента (сопряжения), его средний ресурс \bar{T} и показатель (коэффициент) вариации ν , показатель динамики изнашивания α (определяются экспериментально, по результатам эксплуатационных наблюдений, или ускоренных испытаний, или по справочным данным); величина предельного износа U_n (задаётся техническими требованиями или определяется по известной методике); максимальный начальный зазор Π_n (известен по допускам на изготовление и сборку); показатель приработки $\Delta\Pi$ (зависит от качества изготовления и сборки); межремонтная наработка t_m (определяется сроком службы быстроизнашивающихся ресурсных деталей, достигающих предельного состояния).

Имеем следующие исходные данные: закон распределения – нормальный (ЗНР); $\nu = 0,20$; $\bar{T} = 11800$ час; $t_m = 4800$ час; $U_n = 0,217$ мм (определён по методике, изложенной в работе [34]); $\Pi_n = 0,130$ мм (известен по чертежу); $\Delta\Pi = 0$; $\alpha = 2$ (по справочным данным).

Последовательность расчёта

1) По формулам (13) и (17), (18) или данным табл. 1 определяем нормированные величины T_0 и $T_0(\gamma)$:

$$T_0 = \frac{\bar{T}}{t_m} = \frac{11800}{4800} = 2,4583; \quad T_0(\gamma) = \frac{T(0,90)}{\bar{T}} = 0,744 \quad (\text{по табл. 1}).$$

2) По формуле (19) определяем нормированное значение допускаемого отклонения параметра (износа):

$$D_0 = \left[1 - \frac{1}{T_0 T_0(0,90)} \right]^\alpha = \left[1 - \frac{1}{2,4583 \times 0,744} \right]^2 = 0,2054$$

3) Абсолютная величина допускаемого отклонения (износа):

$$D = D_0 \times U_n = 0,2054 \times 0,217 = 0,0446 \text{ мм.}$$

4) Абсолютную величину допускаемого значения (зазора) определяем по формуле (24):

$$P_D = |P_n \pm (D + \Delta\Pi)| = |0,130 + (0,0446 + 0)| = 0,1746 \text{ мм.}$$

При более высоких требованиях к безотказности назначаем $\gamma = 0,95$. Используя ту же последовательность расчёта, получаем:

$$T_0 = 2,4583; \quad T_0(\gamma) = \frac{T(0,95)}{\bar{T}} = 0,671.$$

$$D_0 = \left[1 - \frac{1}{T_0 T_0(0,95)} \right]^\alpha = \left[1 - \frac{1}{2,4583 \times 0,671} \right]^2 = 0,1550.$$

$$D = 0,1550 \times 0,217 = 0,0336 \text{ мм.}$$

$$P_D = |0,130 + (0,0336 + 0)| = 0,1636 \text{ мм.}$$

При более низких требованиях к безотказности в очередном межремонтном (межконтрольном) периоде назначаем $\gamma = 0,80$. При этом имеем:

$$T_0 = 2,4583; \quad T_0(\gamma) = \frac{T(0,80)}{\bar{T}} = 0,832.$$

$$D_0 = \left[1 - \frac{1}{T_0 T_0(0,80)} \right]^\alpha = \left[1 - \frac{1}{2,4583 \times 0,832} \right]^2 = 0,2612$$

$$D = 0,2612 \times 0,217 = 0,0567 \text{ мм.}$$

$$P_D = |0,130 + (0,0567 + 0)| = 0,1867 \text{ мм.}$$

Результаты расчётов показывают уменьшение значений D и P_D при повышении требований к безотказной наработке и наоборот, увеличение значений D и P_D при понижении требований к безотказной наработке. Отметим, что допускаемые значения D и P_D тесно связаны с установленной величиной предельного износа U_n и предельного зазора P_n .

Применение формул (17), (18) и (21) позволяет определять $T_o(\gamma)$ для любых значений γ и показателя вариации ν , не указанных в табл. 1.

Аналогичные расчёты можно проводить как для износосов, так и для других контролируемых параметров элементов и узлов машин по различным диагностическим признакам.

Выводы:

Разработанная методика позволяет следующее:

- устанавливать допускаемые параметры элементов машин, обеспечивающие задаваемую или требуемую вероятность безотказной наработки в очередном межремонтном периоде;
- давать оценку по безотказности для допускаемых параметров, рекомендованных в существующих технических требованиях на ремонт;
- проводить сравнительный анализ допускаемых параметров элементов, получаемых по различным методикам;
- оперативно использовать данную методику в практике ремонтного производства;
- учитывать требования потребителя (заказчика) по обеспечению вероятности безотказной наработки в межремонтном периоде, от чего может существенно зависеть стоимость ремонта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проников А.С. Расчёт и конструирование металлорежущих станков. - М.: Высшая школа, 1968. - 431 с.
2. Артемьев Ю.Н. Контроль технического состояния тракторных деталей при ремонте: справочник / Ю.Н. Артемьев, И.В. Волгин, А.С. Гальперин, В.П. Дядюшко - М.: Колос, 1973. - 624 с.
3. Проников А.С. Надёжность машин. - М.: Машиностроение, 1978. - 592 с.
4. Михлин В.М. Управление надёжностью сельскохозяйственной техники. - М.: Колос, 1984. - 335 с.
5. Лезин П.П. Формирование надёжности мобильной сельскохозяйственной техники при её ремонте: автореф. дис. ... докт. тех. наук. – М.: 1987. – 35 с.
6. Кривенко П.М. Руководящий технический материал: предельные и допускаемые параметры дизелей, их деталей и соединений при ремонте / П.М. Кривенко, Л.К. Челпан. – М.: ГОСНИТИ, 1989. – 100 с.
7. Челпан Л.К. Предельные и допускаемые технико-экономические параметры дизелей, размеры деталей и соединений при ремонте: автореф. дис. ... докт. тех. наук. – М.: 1990. – 44 с.
8. Игнатъев Г.С. Приремонтное диагностирование и необезличивание составных частей агрегатов сельскохозяйственной техники: автореф. дис. ... докт. тех. наук. – Челябинск: 1989. – 38 с.

9. Михлин В.М. Метод определения допускаемых износов деталей, обеспечивающий повышение их безотказности / В.М. Михлин, В.Н. Дорогой // Вестник машиностроения, 2008. №7. – С. 11 – 14.
10. Дорогой В.Н. Ресурсосберегающая методика определения допускаемых при эксплуатации износов элементов, отклонений параметров машин: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – ГНУ ГОСНИТИ. М.: 2009. – 19 с.
11. Табаков П.А. Новая методика определения допускаемого износа деталей при эксплуатации / П.А. Табаков, А.А. Соломашкин, В.М. Михлин // Международный научный журнал. - 2011. - №1. - С. 56 – 60.
12. Табаков П.А. Развитие новой методики определения допускаемого износа деталей при эксплуатации / П.А. Табаков, А.А. Соломашкин, В.М. Михлин // Достижения науки и техники АПК. - 2011. - №7. - С. 68 – 70.
13. Мартышкин А.П. Оптимизация предельных и допускаемых значений структурных параметров технического состояния элементов машин (на примере основных сопряжений масляного насоса дизеля Д-240): автореф. дис. ... канд. тех. наук. Мордов. гос. ун-т. - Саранск, 1993. – 15 с.
14. Мартышкин А.П. Анализ и моделирование надёжности технологических процессов с позиций системного подхода / А.П. Мартышкин, С.Е. Маскайкина, Н.И. Полушина // Сб. науч. трудов учёных Мордовского государственного университета имени Н.П. Огарёва. Ч. II. – Саранск, 1998 – С. 112 – 113.
15. Мартышкин А.П. Техничко-экономическая оптимизация и моделирование надёжности технологических систем / А.П. Мартышкин, Л.К. Челпан, А.А. Макеев // Обеспечение надёжности машин при эксплуатации и ремонте: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Саранск, 1998 – С. 94 – 96.
16. Лезин П.П. Формирование надёжности технологических процессов в машиностроительном производстве / П.П. Лезин, А.П. Мартышкин, Н.И. Полушина, С.Е. Маскайкина // Обеспечение надёжности машин при эксплуатации и ремонте: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Саранск, 1998 – С. 96 – 98.
17. Мартышкин А.П. Оптимизация периодичности подналадок технологических систем в серийном производстве / А.П. Мартышкин, Л.А. Кокурина, В.Н. Сурайкин // Повышение эффективности использования сельскохозяйственной техники. Информационный вестник диссертационного совета Д 063.72.04. Выпуск 5. – Саранск, 2000. – С. 70 – 72.
18. Мартышкин А.П. Моделирование изменения точности настройки технологических систем / А.П. Мартышкин, А.В. Щёкин, Н.Н. Веснушкина, Н.А. Ладонкин // Технические и естественные науки: проблемы, теория, практика: Межвуз. сборник научных трудов. – Саранск: СВМО, 2000. С. 47 – 49.
19. Мартышкин А.П. Моделирование надёжности технологических процессов по изменению точности настройки технологических систем / А.П. Мартышкин, Ю.Г. Юфкин, Н.И. Полушина, С.Е. Маскайкина // Технические и естественные науки: проблемы, теория, практика: межвуз. сб. науч. трудов. – Саранск: СВМО, 2000. С. 49 – 51.

20. Мартышкин А.П. Оптимизация настроечных пределов технологических процессов // Машиностроение, : наука техника, образование: сб. науч. тр. VII Всерос. науч. практ. конф. – Рузаевка, 2009. – С. 46 – 48.
21. Сульдин С.П. Моделирование износов деталей узлов ремонтно-технологического оборудования / С.П. Сульдин, А.П. Мартышкин, С.Е. Маскайкина, А.В. Григорьев // Машиностроение: наука техника, образование: сб. науч. тр. IX Всерос. науч. практ. конф. – Рузаевка, 2011. – С. 38 – 41.
22. Мартышкин А.П. Общая схема исследования причин потери точности технологических средств механической обработки / А.П. Мартышкин, С.Е. Маскайкина, Л.Н. Бакаева // Машиностроение, : наука техника, образование: сб. науч. тр. IX Всерос. науч. практ. конф. – Рузаевка, 2011. – С. 63 – 65.
23. Комаров В.А. Моделирование надёжности узлов ремонтно-технологического оборудования по изменению точности настройки / В.А. Комаров, А.П. Мартышкин, А.В. Григорьев // Энергоэффективность технологий и средств механизации в АПК: сб. науч. тр. Междунар. науч. – практ. конф. – Саранск, 2011. – С. 217 – 222.
24. Комаров В.А. Оптимизация предельных и допускаемых отклонений параметров элементов, обеспечивающих заданную вероятность безотказности ремонтно-технологического оборудования / В.А. Комаров, А.П. Мартышкин, А.В. Григорьев // Энергоэффективность технологий и средств механизации в АПК: сб. науч. тр. Междунар. науч. – практ. конф. – Саранск, 2011. – С. 225 – 229.
25. Комаров В.А. Обоснование контролируемых параметров узлов ремонтно-технологического оборудования при ремонтно-обслуживающих воздействиях / В.А. Комаров, А.П. Мартышкин, А.В. Григорьев / Железнодорожный транспорт: наука, техника, образование. Сб. науч. трудов Всероссийской науч.-практ. конф. - Рузаевка. 2011. - С. 17 - 20.
26. Комаров В.А. Оценка влияния износа на узлы ремонтно-технологического оборудования / В.А. Комаров, А.П. Мартышкин, А.В. Григорьев // Железнодорожный транспорт: наука, техника, образование. сб. науч. трудов Всероссийской науч.-практ. конф. - Рузаевка. 2011. - С. 20 - 24.
27. Комаров В.А. Система исследования причин потери точности ремонтно-технологического оборудования при механической обработке / В.А. Комаров, А.П. Мартышкин, А.В. Григорьев // Железнодорожный транспорт: наука, техника, образование. сб. науч. трудов Всероссийской науч.-практ. конф. - Рузаевка. 2011. - С. 24 - 28.
28. Григорьев А.В. Исследование и структурирование причин отказов ремонтно-технологического оборудования ремонтных предприятий / А.В. Григорьев, В.А. Комаров, А.П. Мартышкин // Мат-лы XVI науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов МГУ им. Н.П. Огарева. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. - С. 202 – 205.
29. Комаров В.А. Обоснование влияния величины износа на контролируемые параметры точности узлов технологического оборудования / В.А. Комаров, А.В. Григорьев, А.П. Мартышкин, О.В. Григорьева // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки с/х продукции: материалы IX Междунар. научн.-практ. конф. – Саранск:, 2013. - С. 291 – 296.

30. Комаров В.А. Функции оптимизации границ пределов настройки узлов технологического оборудования предприятия АПК / В.А. Комаров, А.П. Мартышкин, А.В. Григорьев, И.В. Пашин // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки с/х продукции: материалы IX Междунар. науч. практ. конф. – Саранск, 2013. – С. 296 – 299.
31. Комаров В.А. Целевые функции оптимизации параметров точности технологического оборудования / В.А. Комаров, А.В. Григорьев, А.П. Мартышкин // Тракторы и сельхозмашины. – М.: 2013 - №7. – С. 44 – 47.
32. Мартышкин А.П. Определение взаимосвязи между величиной предельного отклонения параметра элемента машины и его безотказностью / А.П. Мартышкин, С.Е. Маскайкина, Л.Н. Бакаева, Н.И. Полуешина // Машиностроение: наука, техника, образование: сб. науч. тр. X Всерос. науч.-практ. конф. – г. Рузаевка, 2014. – Режим доступа: <http://catalog.inforeg.ru/Inet/GetEzineByID/303302>.
33. Мартышкин А.П. Оптимизация пределов настроечных границ технологического оборудования / А.П. Мартышкин, А.М. Майоров, В.А. Глебко, А.А. Сивцова // Железнодорожный транспорт: наука, техника, образование: мат-лы V Всерос. науч.-практ. конф. - Рузаевка. 2015. - С. 41 - 43.
34. Мартышкин А.П. Анализ обоснования предельных параметров элементов машин и получение практической формулы определения предельных отклонений параметров с заданной безотказностью / А.П. Мартышкин, С.Е. Маскайкина, Н.И. Полуешина, Н.Н. Веснушкина // Интернет-журнал «Наукovedение» Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/33TVN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/33TVN215.

Martyshkin Anatoliy Petrovich

National research Mordovia state university, machinery institute
Ruzayevka branch, Russia, Ruzayevka
E-mail: A-martyshkin@yandex.ru

Maskaykina Svetlana Egorovna

National research Mordovia state university, machinery institute
Ruzayevka branch, Russia, Ruzayevka
E-mail: rimstanok@mail.ru

Polueshina Natal'ja Ivanovna

National research Mordovia state university, machinery institute
Ruzayevka branch, Russia, Ruzayevka
E-mail: rimstanok@mail.ru

Vesnushkina Nina Nikolaevna

National research Mordovia state university, machinery institute
Ruzayevka branch, Russia, Ruzayevka
E-mail: nina.vesnushkina@mail.ru

Analysis of optimization methods of machines' parts deviation and development of methods to install them with specified probability of no-failure

Abstract. While solving the problems of improving machines' and technical equipment reliability in the overhaul period there is difficulty with indication of admissible deviation and parameter value of their elements. Admitted value of these parameters should provide remaining life time of the elements corresponding to overhaul period of the machine or the assembly unit.

However existing methods of defining of parameter's admissible deviation have some drawback, hence there is necessity of their improvement. Analysis of the works in this field showed that there are recommendations to define parameters' admissible deviation with specified probability of no-failure and specification of results taking into account the index of variation of real deviation from theoretical one which depends on operation conditions of machines and their elements.

Through the research on the basis of dynamic modeling of machines elements' parameters and the scheme of admissible deviation with the lower confidence bound of element's resource dispersal, we have developed the methodology and have obtained general functions to define admissible deviation of machines' elements which provide their reliability in the overhaul period. The obtained formulae are comparatively simple and can be easily used in repair works.

Keywords: admissible; deviation; parameter; element; machine; no-failure work; analysis; runout; repair; resource; criterion; dependence; probability; failure; index; variation; limit

REFERENCES

1. A.S. Pronikov Calculation and engineering of machine-tools. - M.: High school, 1968. – 431 p.
2. U.N. Artemyev Control of tractors parts in the course of repair: reference book / U.N. Artemyev, I.V. Volgin, A.S. Galperin, V.P. Dyadyushko. – M.: Kolos, 1973. – 624 p.
3. A.S. Pronikov Machines reliability. - M.: Machine engineering, 1978. – 592 p.

4. V.M. Mokhlin Agricultural machines reliability management. – М.: Kolos, 1984. – 335 p.
5. P.P. Lezin Improvement of agricultural machines reliability in the course of their repair. Synopsis of a thesis. – М.: 1987. -35 p.
6. P.M. Krivenko Guide technical material: limit and admissible parameters of diesel and their parts and junctions during repair / Krivenko P.P., Chelpan L.K. – М.: GOSNITI, 1989. – 100 p.
7. L.K. Chelpan Limit and admissible technical and economic diesel parameters, size of parts and junctions during repair: synopsis of a thesis. – М., 1990. - 44 p.
8. G.S. Ignatyev Repair diagnosis and non-depersonalization of agricultural machinery parts: synopsis of a thesis. Chelyabinsk, 1989. – 38 p.
9. V.M. Mikhlin Method of admissible parts wear definition providing improvement of their non-failure / V.M. Mikhlin, V.N. Dorogoy // Vestnik mashinostroyeniya, 2008. N7. – P. 11-14.
10. V.N. Dorogoy. Saving methodology of definition of admissible operational parts wear, deviation: synopsis of a thesis. – GNU GOSNINTI. М.: 2009. – 19 P.
11. P.A. Tabakov New methodology to determine admissible details' runout / P.A. Tabakov, A.A. Solomashkin, V.M. Mikhlin // International scientific journal. – 2011. – N1. - P. 56-60.
12. P.A. Tabakov Development of the new methodology to determine admissible details' runout / P.A. Tabakov, A.A. Solomashkin, V.M. Mikhlin // Achievements of science and technique of APC. - 2011. - №7. - P. 68 – 70.
13. A.P. Martyshkin Optimization of extreme and admissible value of structural parameters of machines' elements technical state (by the example of general interference of diesel's oil pump D-240): synopsis of a thesis, Saransk, 1993. – 15 p.
14. A.P. Martyshkin Analysis and modeling of technical processes reliability with the system approach / A.P. Martyshkin, S.E. Maskaykina, N.I. Polueshina // Proceedings of Scientists of Mordovian State Univesity of N.P. Ogarev. – Saransk, 1993. – 15 p.
15. A.P. Martyshkin Technical-economical optimization and modeling of technical systems reliability / A.P. Martyshkin, L.K. Chelpan, A.A. Makeev // Machines reliability provision during usage and repair: proceedings of All-Russian scientific-technical conference. – Saransk, 1998. – P. 94-96.
16. P.P. Lezin Forming reliability of technical processes in machinery industry / P.P. Lezin, A.P. Martyshkin, N.I. Polueshina, S.E. Maskaykina // Machines reliability provision during usage and repair: proceedings of All-Russian scientific-technical conference. – Saransk, 1998. – P. 96-98.
17. A.P. Martyshkin Optimization of periods of repair of technological systems in manufacturing production / A.P. Martyshkin, L.A. Kokurina, V.N. Suraykin // Enhancement of efficiency of agricultural technique usage – Saransk, 2000. – P. 70-72.
18. A.P. Martyshkin Modelling of accuracy changing of technological systems setup / A.P. Martyshkin, A.V. Shchekin, N.N. Vesnushkina, N.A. Ladonkin // Technique and science: problems, theory and practice: High school proceedings. – Saransk: SVMO, 2000. P. 47-49.

19. A.P. Martyshkin Modelling of technological processes reliability by accuracy changing of technological systems setup / A.P. Martyshkin, U.G. Yufkin, N.I. Polueshina, S.E. Maskaykina // Technique and science: problems, theory and practice: High school proceedings. – Saransk: SVMO, 2000. P. 49-51.
20. A.P. Martyshkin Optimization of setting limits of technological processes // Engineering: science, technique and education: proceedings of VII All-Russian conference. - Ruzayevka, 2009. – P. 46-48.
21. S.P. Suldin Modelling of runout of repair-technological equipment details sites / S.P. Suldin, A.P. Martyshkin, S.E. Maskaykina, A.V. Grigoryev // Engineering: science, technique and education: proceedings of IX All-Russian conference.- Ruzayevka, 2011. – P. 38-41.
22. A.P. Martyshkin General scheme of research of accuracy lost reasons of technological means of tooling / A.P. Martyshkin, S.E. Maskaykina, L.N. Bakaeva // Engineering: science, technique and education: proceedings of IX All-Russian conference.- Ruzayevka, 2011. – P. 63-65.
23. V.A. Komarov Modelling of reliability of repair-technological equipment details sites by changing accuracy setup / V.A. Komarov, A.P. Martyshkin, A.V. Grigoryev // Energy efficiency of technologies and means of mechanization in APC: proceedings of international conference. – Saransk, 2011. - P. 217-222.
24. V.A. Komarov Optimization of extreme and admissible deviation of elements' parameters providing given probability of no-failure work of repair-technological equipment / V.A. Komarov, A.P. Martyshkin, A.V. Grigoryev // Energy efficiency of technologies and means of mechanization in APC: proceedings of international conference. – Saransk, 2011. - P. 225-229.
25. V.A. Komarov Grounding of controlled parameters of repair-technological equipment sites during maintenance / V.A. Komarov, A.P. Martyshkin, A.V. Grigoryev / Railway transport: science, technique, education. Proceedings of international conference. – Ruzaevka. 2011. – P. 17-20.
26. V.A. Komarov Assessment of runout influence on repair-technological equipment sites / V.A. Komarov, A.P. Martyshkin, A.V. Grigoryev // Railway transport: science, technique, education. Proceedings of international conference. – Ruzaevka. 2011. – P. 20-24.
27. V.A. Komarov The system of research of accuracy lost reasons of technological means of tooling / V.A. Komarov, A.P. Martyshkin, A.V. Grigoryev // Railway transport: science, technique, education. Proceedings of international conference. – Ruzaevka. 2011. – P. 24-28.
28. A.V. Grigoryev Research and structuring of reasons of repair-technological equipment failure / A.V. Grigoryev, V.A. Komarov, A.P. Martyshkin // Proceedings of XVI of conference of young scientists and post-graduates of MSU of N.P. Ogarev. – Saransk: publishing house of MSU, 2012. – P. 202-205.
29. V.A. Komarov Grounding of runout value influence on controlled parameters of repair-technological equipment sites / V.A. Komarov, A.V. Grigoryev, A.P. Martyshkin, O.V. Grigoryeva // Proceedings of IX International conference. – Saransk, 2013. – P. 291-299.

30. V.A. Komarov Functions of optimization of sites setup limits of technological equipment / V.A. Komarov, A.V. Grigoryev, A.P. Martyshkin, I.V. Pashin // Proceedings of IX International conference. – Saransk, 2013. – P. 296-299.
31. V.A. Komarov Functions of accuracy parameters optimization of technological equipment / V.A. Komarov, A.V. Grigoryev, A.P. Martyshkin // Agricultural machinery. – M.: 2013. – N7. – P. 44-47.
32. A.P. Martyshkin Determination of interconnection between the value of extreme deviation of machine's element and its no-failure work / A.P. Martyshkin, S.E. Maskaykina, N.I. Polueshina, L.N. Bakaeva // Engineering: science, technique and education: proceedings of IX All-Russian conference. - Ruzayevka, 2014. – Access mode: <http://catalog.inforeg.ru/Inet/GetEzineByID/303302>.
33. A.P. Martyshkin Optimization of limits of technological equipment setup limits / A.P. Martyshkin, A.M. Mayorov, V.A. Glebko, A.A. Sivtcova // Railway transport: science, technique, education. Proceedings of V All-Russian conference. – Ruzaevka. 2015. – P. 41-43.
34. A.P. Martyshkin Analysis of grounding of machines' elements extreme parameters and receipt of the practical formulae to find extreme deviation of parameters with given no-failure work / A.P. Martyshkin, S.E. Maskaykina, N.I. Polueshina, N.N. Vesnushkina // Internet-journal "Naukovedenie" Volume 7, N2 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/33TVN215.pdf> (free access).