

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ В МОДЕЛЯХ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

© 2022

А. В. Рагуткин кандидат технических наук, проректор по инновационному развитию;
МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва
ragutkinav@gmail.com

При разработке моделей ответственных изделий машиностроения требуется решение динамических задач с учётом изменения размерных цепей звеньев в процессе функционирования механизмов. Предложена методика расчёта динамических размерных цепей применительно к решению прямых и обратных задач. Решение прямой задачи приводится при условиях, что поле рассеяния замыкающего звена включает погрешности изготовления, связанные с изменением размеров исходных звеньев под действием эксплуатационных нагрузок. Для получения величины скорости изнашивания деталей предложено использовать эмпирические зависимости связи интенсивностей изнашивания и образования водорода в процессе взаимодействия материалов.

Цифровые модели механизмов; размерные цепи; надёжность функционирования технических объектов

Цитирование: Рагуткин А.В. Динамические задачи в моделях работоспособности изделий // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 3. С. 116-126.
DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-3-116-126

Введение

При разработке моделей сложных изделий с высокой степенью проработки в большинстве случаев необходимо решение динамических задач с учётом факторов, приводящих к изменению размерных цепей звеньев в процессе функционирования. К ним относятся тепловые воздействия, изнашивание, деформации под действием приложенных сил и т.п. Решение статической задачи направлено, в основном, на обеспечение собираемости, а динамической – на назначение допусков, обеспечивающих как собираемость при изготовлении, так и работоспособность в течение установленных в проекте наработок [1 – 4]. Расчёты динамических размерных цепей должны сводиться к решению следующих задач.

Прямая задача

Заданы допустимые пределы изменения замыкающего звена (или односторонняя граница). Границы обычно назначаются с учётом требований функционального назначения и эксплуатационной надёжности. Например, величина непараллельности рабочей плоскости стола оси вращения шпинделя станка в плоскости, проходящей через ось шпинделя, должна быть не более 0,01/300 мм; зазор в сопряжении гидравлического устройства не должен превосходить 0,1 мм и т.д.

В таких случаях при установлении требований к величине замыкающего звена учитываются эксплуатационные требования к изделиям: в первом примере нарушение требований к непараллельности приведёт к нарушению норм точности обработки на данном типе станка, во втором – к нарушению герметичности устройства. Следовательно для обеспечения соблюдения указанных параметров в течение времени t необходимо, чтобы допуски на составляющие изделие звенья (и на их номинальные значения) назначались так, чтобы величина замыкающего звена за установленную наработку не превысила указанной. При этом одновременно должно соблюдаться условие собира-

емости. Оба эти условия обеспечиваются, если поле рассеяния случайной величины замыкающего звена на отрезке $[0, t]$ для всех $t_i \in [0, t]$ с заданным уровнем доверия будет находиться в пределах допуска на замыкающее звено. В частном случае, когда функция изменения величины замыкающего звена монотонная, достаточно потребовать, чтобы поле рассеяния величины замыкающего звена находилось в пределах допуска в начальный момент $t = t_0$ (т.е. после сборки) и в момент $t = t_y$, где t_y – заданная наработка до отказа для рассматриваемого изделия или параметра, если его величина является критерием предельного состояния. Если при решении прямой задачи величины составляющих звеньев также изменяются во времени, то решение должно сводиться к определению допусков на изготовление при заданных значениях изменения их величин за время t_y .

Обратная задача

Заданы допуски на составляющие звенья и величины их изменения за наработку t_y . Требуется определить допуск на замыкающее звено. Очевидно, что в этом случае поля рассеяния величины замыкающего звена в момент $t = t_0$ и $t = t_y$ должны быть различны. В случае монотонного изменения величины замыкающего звена за нижнюю границу допуска должна приниматься нижняя граница поля рассеяния для момента $t = t_0$ и верхняя граница – для момента $t = t_y$ (при монотонно возрастающей функции изменения величины замыкающего звена).

Рассмотрим некоторые типовые модели, возможные при решении обратной задачи. Наиболее простая модель рассматривается в тех случаях, когда под действием эксплуатационных факторов происходит изменение начальных значений звеньев размерных цепей. Под начальными понимаем такие величины составляющих или замыкающих звеньев, которые цепи имеют в начальный момент функционирования [5; 6]. Например, для конструкторской размерной цепи – это величины звеньев после сборки изделия.

В данной модели предполагается, что величина изменения звеньев цепей может быть представлена в виде случайных или постоянных значений. Такая модель типична для случаев, когда возникающие при функционировании объекта изменения звеньев размерных цепей постоянны во времени. К этой же модели приводят случаи, когда задана (известна или может быть определена) величина изменения звеньев за некоторый период наработки (срок службы). Допускаемая данная величина может быть получена также на основе требований обеспечения установленного уровня надёжности.

Пусть случайные величины, входящие в размерную цепь, описываются зависимостью:

$$x_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i (x_i + C_i), \quad (1)$$

где x_{Δ} – случайная величина замыкающего звена; ξ_i – передаточное отношение; x_i – случайная величина составляющего звена; C_i – постоянная величина, характеризующая изменение время t_y i -го составляющего звена.

Из (1) получим:

$$M(x_0) = M\left(\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i x_i\right) + \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i C_i;$$

$$D(x_\Delta) = D\left(\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i x_i\right),$$

где $M(x_0)$, $D(x_\Delta)$ – математическое ожидание и дисперсия соответствующих случайных величин.

Введём обозначения:

$$\alpha = \frac{M(x) - \Delta\omega}{\omega/2}, \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{2\sigma}{\omega}, \quad (3)$$

где α – коэффициент относительной асимметрии; λ – коэффициент относительного рассеивания; $\Delta\omega$ – коэффициент середины поля рассеивания; ω – поле рассеивания; σ – среднее квадратическое отклонение.

Под ω понимается практически предельное поле рассеивания [4], охватывающее 99,73% всех значений генеральной совокупности. В частных случаях может приниматься, что поле рассеивания охватывает $(1 - \gamma)$ значений генеральной совокупности, где γ будет характеризовать величину риска.

С учётом принятых обозначений получим:

$$\Delta\omega_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta\omega_i\right) - \frac{\alpha_\omega \omega_\Delta}{2} + \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i C_i;$$

$$\omega_\Delta = \frac{1}{\lambda_\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 \omega_i^2},$$

где m – число звеньев размерной цепи.

Индексы Δ и i указывают, что соответствующие параметры относятся к замыкающему (Δ) или составляющему (i) звену.

Пусть имеет место уравнение:

$$x_\Delta = \sum \xi_i (x_i + z_i), \quad (4)$$

где z_i – случайные величины, характеризующие изменение составляющих звеньев под действием эксплуатационных нагрузок. В рамках решения задач размерных цепей примем, что функции распределения величин z_i известны.

Рассматриваемый случай (4) наиболее типичен. Он имеет место, например, когда под влиянием деформаций или износа за некоторый период эксплуатации t_y (до ремон-

та, замены и т.п.) детали или поверхности, являющиеся звеньями размерной цепи, изменяют свою величину, причём эта величина является случайной.

Выполняя преобразования, подобные рассмотренным ранее, получим:

$$\Delta\omega_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \frac{\alpha_{iz} \omega_{iz}}{2} + \Delta\omega_i + \Delta\omega_{iz} \right) - \frac{\alpha_{\Delta} \omega_{\Delta}}{2};$$

$$\omega_{\Delta} = \frac{1}{\lambda_{\Delta}} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 \omega_i^2 + \sum_{iz} \xi_i^2 \lambda_{iz}^2 \omega_{iz}^2},$$

где $\alpha_{iz}, \omega_{iz}, \lambda_{iz}, \Delta\omega_{iz}$ – соответствующие параметры распределения дополнительных погрешностей составляющих звеньев.

При рассмотрении прямой задачи допуски на составляющие звенья x_i должны назначаться из условия:

$$\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i x_i = x_{\Delta} - \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i z_i .$$

В этом случае решение прямой задачи проводится при условиях, что поле рассеяния замыкающего звена включает погрешности как изготовления, так и погрешности, обусловленные изменением исходных звеньев под действием эксплуатационных нагрузок. Последние в отдельных случаях могут приводить к дополнительным погрешностям, которые могут рассматриваться как самостоятельные составляющие звенья, т.е.:

$$x_{\Delta} = \sum_{i=p}^{m-1} \xi_i x_i + \sum_{j=1}^p \xi_j z_j ,$$

где p – число эксплуатационных погрешностей, приводящих к изменению замыкающего звена.

В этом случае:

$$\Delta\omega_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta\omega_i \right) + \sum_{i=1}^p \xi_{jz} \left(\frac{\alpha_{jz} \omega_{jz}}{2} + \Delta\omega_{jz} \right) - \frac{\alpha_{\Delta} \omega_{\Delta}}{2} ;$$

$$\omega_{\Delta} = \frac{1}{\lambda_{\Delta}} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 \omega_i^2 + \sum_{i=1}^p \xi_{jz}^2 \lambda_{jz}^2 \omega_{jz}^2} ,$$

где $\alpha_{jz}, \xi_{jz}, \lambda_{jz}, \omega_{jz}$ – параметры эксплуатационных погрешностей, приводящих к изменению величины замыкающего звена.

Рассмотрим теперь случай расчёта допусков, когда заданы неслучайные функции изменения математического ожидания и дисперсии случайных величин составляющих звеньев (рис. 1).

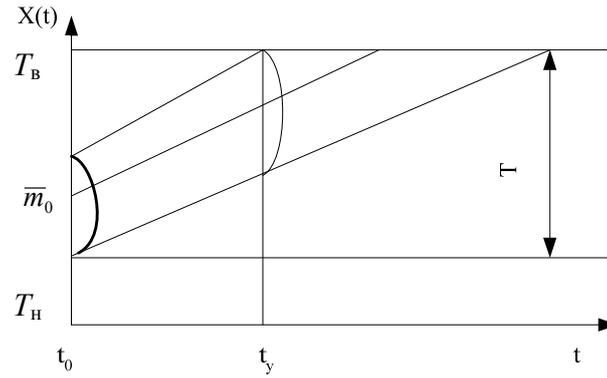


Рис. 1. Схематическое изображение линейного изменения параметров составляющих звеньев

В этом случае

$$m_i(t) = \bar{m}_{i0} + \Delta m_i t$$

$$\sigma_i(t) = \sigma_{i0} + \Delta \sigma_{i0} t$$

где $m_i(t)$, $\sigma_i(t)$ – неслучайные функции изменения математического ожидания и среднего квадратического отклонения величины i -го составляющего звена; t – продолжительность функционирования объекта (наработка, ресурс); $\Delta m_i, \Delta \sigma_{i0}$ – неслучайные величины скорости изменения величин $m_i(t)$, $\sigma_i(t)$.

Для замыкающего звена для моментов времени t_0 и t_y получим:

$$m_z(t_0) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \bar{m}_{i0}; \quad \sigma_x^2(t_0) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \sigma_{i0}^2; \quad (5)$$

$$m_z(t_y) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \bar{m}_{i0} + t_y \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta m_i;$$

$$\sigma_x(t_y) = \sqrt{\sum_{i=0}^{m-1} \xi_i^2 (\sigma_{i0} + \Delta \sigma_{i0} t_y)^2}. \quad (6)$$

Нижнюю T_H и верхнюю T_B границы допуска зададим выражениями:

$$T_H = m_x(t_0) - x_{\alpha_1} \sigma_x(t_0);$$

$$T_B = m_x(t_y) - x_{\alpha_2} \sigma_x(t_y), \quad (7)$$

где $x_{\alpha_1}, x_{\alpha_2}$ – квантили, соответствующие величинам риска α_1, α_2 .

С учётом (2) и (3) можно записать:

$$\bar{m}_{i0} = \frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i,$$

$$\sigma_{i0} = \frac{\lambda_i \omega_i}{2}.$$

Подставляя в (5) выражения (6) и (7), найдём:

$$T_H = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) - x_{\alpha 1} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right)^2}, \quad (8)$$

$$T_B = \sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) + t_y \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta m_i + x_{\alpha 2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right) + \Delta \sigma_i t_y \right]^2}. \quad (9)$$

Из (8), (9) получаем

$$\omega_\Delta = T = T_B - T_H = t_y \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta m_i + x_{\alpha 1} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right)^2} + x_{\alpha 2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right) + \Delta \sigma_i t_y \right]^2},$$

$$\Delta \omega_\Delta = \frac{T_H + T_B}{2} + \sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) + \frac{1}{2} \left[t_y \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta m_i + x_{\alpha 2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right) + \Delta \sigma_i t_y \right]^2} - x_{\alpha 1} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right)^2} \right].$$

Рассмотрим более общий случай (рис. 2):

$$m_i(t) = \bar{m}_{i0} + \Delta m_i t^{\beta_{1i}},$$

$$\sigma_i(t) = \sigma_{i0} + \Delta \sigma_{i0} t^{\beta_{2i}}.$$

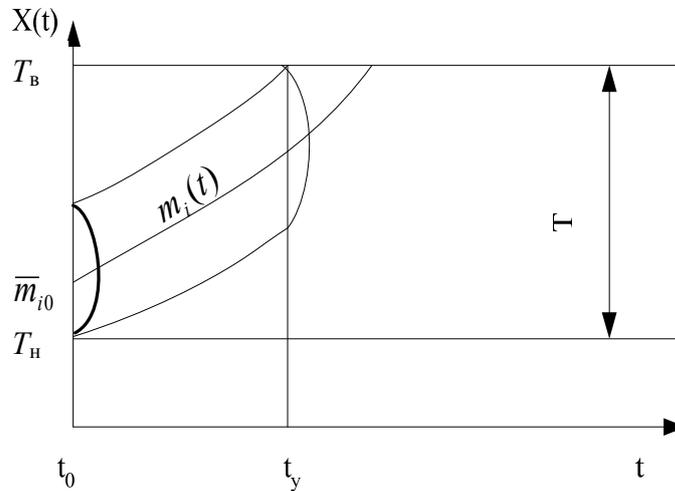


Рис. 2. Схематическое изображение нелинейного изменения параметров составляющих звеньев

По аналогии с приведёнными выше преобразованиями получим:

$$m_x(t_0) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i m_{i0} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right),$$

$$m_x(t_y) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i (\bar{m}_{i0} + \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}}) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i + \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}} \right) =$$

$$= \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) + \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}},$$

$$\sigma_x(t_0) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \sigma_{i0}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right)^2},$$

$$\sigma_x(t_y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \sigma_i^2(t)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 [\sigma_{i0} + \Delta \sigma_{i0} t_y^{\beta_{2i}}]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\frac{\lambda_i \omega_i}{2} + \Delta \sigma_{i0} t_y^{\beta_{2i}} \right]^2}.$$

Задаваясь рисками α_1 и α_2 , находим:

$$T_H = m_x(t_0) - x_{\alpha_1} \sigma_x(t_0) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) - x_{\alpha_1} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} \right)^2},$$

$$T_B = m_x(t_y) + x_{\alpha_2} \sigma_x(t_y) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) + \sum_{i=1}^{m-1} \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}} + x_{\alpha_2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\frac{\lambda_i \omega_i}{2} + \Delta \sigma_{i0} t_y^{\beta_{2i}} \right]^2}.$$

Отсюда:

$$T = \sum_{i=1}^{m-1} \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}} + x_{\alpha_2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\frac{\lambda_i \omega_i}{2} + \Delta \sigma_{i0} t_y^{\beta_{2i}} \right]^2} + x_{\alpha_1} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right)^2}, \quad (10)$$

$$\Delta \omega_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) + \frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^{m-1} \Delta m_i t_y^{\beta_{1i}} + x_{\alpha_2} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\frac{\lambda_i \omega_i}{2} + \Delta \sigma_{i0} t_y^{\beta_{2i}} \right]^2} + x_{\alpha_1} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right)^2} \right\}. \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) позволяют определить поле рассеяния (принимаемое за допуск) и координату середины поля рассеяния (поля допуска) замыкающего звена.

Рассмотрим пример, когда известна случайная функция изменения величины замыкающего звена, а параметры составляющих звеньев заданы своими значениями для момента времени t_0 . Пусть:

$$m_x(t) = \bar{m}_0(t_0) + \Delta m t^{\beta_1};$$

$$\sigma_x(t) = \sigma_x(t_0) + \Delta \sigma t^{\beta_2},$$

где $\bar{m}_0(t), \sigma_x(t_0)$ – значения параметров замыкающего звена в начальный момент времени t_0 ; $\Delta m, \Delta \sigma$ – неслучайные величины скорости изменения соответствующих параметров.

Учитывая, что:

$$\bar{m}_0(t_0) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \bar{m}_{i0}(t_0) = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right), \quad \sigma_x(t_0) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \sigma_{i0}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \frac{\lambda_i^2 \omega_i^2}{4}},$$

$$m_x(t) = \frac{\alpha_\Delta \omega_\Delta}{2} + \Delta \omega_\Delta, \quad \sigma_x(t) = \frac{\lambda_\Delta \omega_\Delta}{2},$$

получаем:

$$\Delta \omega_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i \left(\frac{\alpha_i \omega_i}{2} + \Delta \omega_i \right) + \Delta m t^{\beta_1} - \frac{\alpha_\Delta \omega_\Delta}{2},$$

$$\omega_\Delta = \frac{2}{\lambda_\Delta} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \left[\left(\frac{\lambda_i \omega_i}{2} \right) + \Delta \sigma t^{\beta_2} \right]^2}.$$

Аналогично можно найти выражения для других видов функций изменения $m_x(t), \sigma_x(t)$.

Данная задача может быть решена также из рассмотрения вероятности первого пересечения верхней или нижней границы допуска. На практике наибольшую сложность в решении рассмотренных задач представляет получение значений $\Delta m, \Delta \sigma$, поскольку условия применения изделий по назначению могут существенно отличаться. В большей степени это относится к узлам трения, интенсивность изнашивания деталей которых зависит от множества взаимосвязанных факторов [7]. Поэтому при разработке цифровых моделей изделий необходим учёт моделей изнашивания составляющих изделие звеньев применительно к условиям функционирования. Кроме того, поскольку параметры работоспособности материалов, из которых изготавливаются детали, закладываются на стадии их производства, необходимо учитывать и модели технологического обеспечения качества обработки материалов [8 – 11].

«Маркерным» показателем процессов, происходящих с материалами на этапах жизненного цикла, может выступать процесс перераспределения диффузионно-активного водорода в поверхностных слоях деталей [12]. Для этого необходимо создание широкого спектра статистических баз экспериментальных данных, применимых для проектных расчётов.

Предлагается [12] для получения величины скорости изменения параметров изнашивания деталей использовать эмпирические зависимости вида:

$$\frac{J_h}{C_{H_2}} = a + bP + ch,$$

где J_h – интенсивность изнашивания материалов; C_{H_2} – интенсивность образования водорода при их взаимодействии; P – нормальное усилие (параметр, характеризующий нагружение); h – характеристика смазочной среды; a, b, c – константы для данных сочетаний материалов.

Для всех исследуемых параметров взаимодействия материалов авторами [12] получены обоснованные стохастические связи между износом, содержанием водорода, величиной нагрузки, а также определены аналитические зависимости, позволяющие по

значениям предикторных переменных прогнозировать значение износа деталей узлов трения.

Для ускорения набора статистических баз экспериментальных данных возможно использование данного метода, а также методов, основанных, например, на изучении процессов вибрации [8] на уже функционирующих объектах. В дальнейшем важным этапом должно стать установление связи свойств материалов на этапах изготовления деталей и эксплуатации. «Маркерные» показатели этих взаимосвязей должны ответить на вопрос о необходимости внесения изменений в конструкторскую и технологическую документацию.

Заключение

Предложенная методика расчёта динамических размерных цепей позволяет решать прямые и обратные задачи определения допустимых изменений в размерах звеньев механизмов. Необходимым условием является обоснованное наполнение моделей экспериментальными данными по физико-механическим процессам, происходящим в материалах деталей, и составление прогностических моделей их изнашивания, что позволит проводить изучение объектов на математической модели в вычислительных экспериментах и отвечать на вопросы, которые ставят инженеры, конструкторы и технологи.

Библиографический список

1. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 1-5. Стандартизация и сертификация в машиностроении / под общ. редакцией Г.П. Воронина. М.: Машиностроение, 2002. 672 с.
2. Машиностроение. Энциклопедия. Т. III-7. Измерения, контроль, испытания и диагностика / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1996. 464 с.
3. Палей М.А., Романов А.Б., Брагинский В.А. Допуски и посадки: справочник. В 2 ч. Ч. 2. СПб: Политехника, 2001. 608 с.
4. РД 50-635-87. Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчёта линейных и угловых цепей. М.: Издательство стандартов, 1987. 45 с.
5. Кравченко И.Н., Пучин Е.А., Чепурин А.В., Ставровский М.Е., Пузряков А.Ф., Ерофеев М.Н. Оценка надёжности машин и оборудования: теория и практика. М.: Инфра-М, 2012. 336 с.
6. Дин Э. NX 8.5 от Siemens PLM Software // САПР и графика. 2013. № 3. С. 40-44.
7. Пирогов В.В., Ставровский М.Е., Сидоров И.М., Василевский А.В., Александров И.А., Винокуров О.Е. Эксплуатация и ремонт технологического оборудования. М.: Эко-Пресс, 2021. 321 с.
8. Рагуткин А.В., Сидоров М.И., Юрцев Е.С. Модели организации цифрового машиностроительного производства. М.: Эко-Пресс, 2021. 289 с.
9. Ragutkin A.V., Sidorov M.I., Stavrovskij M.E. Some aspects of antifriction coatings application efficiency by means of finishing nonabrasive antifriction treatment // Journal of Mining Institute. 2019. V. 236. P. 239-244. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.239
10. Vagin A.V., Albagachiev A.Y., Sidorov M.I., Stavrovskii M.E. Improving the life of artillery systems // Russian Engineering Research. 2017. V. 37, Iss. 3. P. 211-217. DOI: 10.3103/S1068798X17030212
11. Albagachiev A.Y., Lukashev E.A., Sidorov M.I., Stavrovskii M.E. Tribochemical kinetics of external friction // Russian Engineering Research. 2017. V. 37, Iss. 8. P. 686-693. DOI: 10.3103/S1068798X17080044

12. Ставровский М.Е., Сидоров М.И., Албагачиев А.Ю., Рагуткин А.В., Лукашев П.Е. О роли водорода в процессах разрушения материалов. М.: Эко-Пресс, 2020. 208 с.

DYNAMIC TASKS IN MODELS OF PRODUCT OPERABILITY

© 2022

A. V. Ragutkin Candidate of Science (Engineering), Vice-Rector for Innovative Development; MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation; ragutkinav@gmail.com

When developing models of critical mechanical engineering products, it is necessary to solve dynamic problems, taking into account changes in the dimension chains of links in the process of functioning of mechanisms. A method of calculating dynamic dimension chains as applied to solving direct and inverse problems is proposed. The solution of a direct problem is given under the condition that the stray field of the master link includes the errors of production and those related to the changes in the dimensions of the initial links under the action of operational loads. To obtain the value of the product part wear rate we propose using empirical dependences of the relation between the wear rate and formation of hydrogen in the process of interaction of materials.

Digital models of mechanisms; dimension circuits; reliability of functioning of technical objects

Citation: Ragutkin A.V. Dynamic tasks in models of product operability. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 3. P. 116-126. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-3-116-126

References

1. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. 1-5. Standartizatsiya i sertifikatsiya v mashinostroenii* [Mechanical Engineering. Encyclopedia. V. 1-5. Standardization and certification in mechanical engineering / ed. by G.P. Voronin]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2002. 672 p.
2. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. III-7. Izmereniya, kontrol', ispytaniya i diagnostika* [Mechanical Engineering. Encyclopedia. V. III-7. Measurements, control, testing and diagnostics / ed. by V.V. Klyuyev]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1996. 464 p.
3. Paley M.A., Romanov A.B., Braginskiy V.A. *Dopuski i posadki: spravochnik* [Fits and clearances. Directory]. In 2 parts. Part 2. SPb: Politekhnik Publ., 2001. 608 p.
4. RD 50-635-87. Guidelines. Dimension chains. Basic concepts. Methods for calculating linear and angular circuits. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1987. 45 p. (In Russ.)
5. Kravchenko I.N., Puchin E.A., Chepurin A.V., Stavrovskiy M.E., Puzryakov A.F., Erofeev M.N. *Otsenka nadezhnosti mashin i oborudovaniya: teoriya i praktika* [Reliability assessment of machines and equipment: theory and practice]. Moscow: Infra-M Publ., 2012. 336 p.
6. Dean A. Siemens PLM software NX 8.5 // DEVELOP3D. 2012. Iss. 11. P. 42-47.
7. Pirogov V.V., Stavrovskiy M.E., Sidorov I.M., Vasilevskiy A.V., Aleksandrov I.A., Vinokurov O.E. *Ekspluatatsiya i remont tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Operation and maintenance of technological equipment]. Moscow: Eko-Press Publ., 2021. 321 p.
8. Ragutkin A.V., Sidorov M.I., Yurtsev E.S. *Modeli organizatsii tsifrovogo mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Models of organization of digital machinery production]. Moscow: Eko-Press Publ., 2021. 289 p.
9. Ragutkin A.V., Sidorov M.I., Stavrovskiy M.E. Some aspects of antifriction coatings application efficiency by means of finishing nonabrasive antifriction treatment. *Journal of Mining Institute*. 2019. V. 236. P. 239-244. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.239

10. Vagin A.V., Albagachiev A.Y., Sidorov M.I., Stavrovskii M.E. Improving the life of artillery systems. *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37, Iss. 3. P. 211-217. DOI: 10.3103/S1068798X17030212

11. Albagachiev A.Y., Lukashev E.A., Sidorov M.I., Stavrovskii M.E. Tribochemical kinetics of external friction. *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37, Iss. 8. P. 686-693. DOI: 10.3103/S1068798X17080044

12. Stavrovskiy M.E., Sidorov M.I., Albagachiev A.Yu., Ragutkin A.V., Lukashev P.E. *O roli vodoroda v protsessakh razrusheniya materialov* [The role of hydrogen in the processes of destruction of materials]. Moscow: Eko-Press Publ., 2020. 208 p.