

**Ящерицын П.И., Хейфец М.Л., Клименко С.А., Васильев А.С.**

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

*Физико-технический институт НАН Беларуси*

*Минск, Беларусь*

*Полоцкий государственный университет*

*Новополоцк, Беларусь*

*Институт сверхтвердых материалов*

*им. В.Н.Бакуля НАН Украины*

*Киев, Украина*

*Московский государственный технический*

*университет им. Н.Э.Баумана*

*Москва, Россия*

Определение и оценка изменений в технологических и эксплуатационных процессах показателей качества машин с учетом их взаимного влияния затруднены многосвязным характером взаимодействий формирующихся свойств изделий [1,2]. Для разработки математического аппарата передачи показателей качества изделий при технологическом и эксплуатационном наследовании необходимо корректное понижение размерности задачи описания трансформации свойств [3,4].

Корректному понижению размерности задачи описания трансформации свойств способствует замена множества объектов, взаимодействующих с изделием, одним объектом – технологической или эксплуатационной средой при тождественности результатов такой замены. Определение характеристик многосвязной среды позволяет при известных результатах ее взаимодействия с изделием находить рациональные значения его показателей качества и осуществлять направленное формирование технологической и эксплуатационной среды. Эти среды должны предусматривать благоприятное развитие полезных свойств и пресечение развития свойств, снижающих качество изделий путем использования технологических и эксплуатационных барьеров .

Трудности описания многосвязных взаимодействий при формировании и изменении показателей качества изделия в процессах изготовления и эксплуатации машины могут быть преодолены на основе применения синергетической концепции, использующей понятие устойчивости мод непрерывной случайной величины, под которыми понимают такие значения показателя, при которых плотность его распределения имеет максимумы [5]. Согласно синергетическому

подходу в процессе развития устойчивые моды подстраиваются под неустойчивые моды и могут быть исключены. Это приводит к резкому сокращению числа контролируемых показателей – степеней свободы технологической и эксплуатационной системы. Получающиеся в результате такого сокращения показатели уравнения группируются в универсальные классы вида [6]

$$\frac{\partial}{\partial \tau} U^* = G(U^*, \nabla U^*) + D \nabla^2 U^* + F(\tau),$$

где  $U^*$  - контролируемый показатель;  $\tau$  - текущее время;  $G$  - нелинейная функция  $U^*$  и градиента  $U^*$ ;  $D$  - коэффициент, описывающий диффузию, когда его значение действительно, или распространение волн при его мнимом значении;  $F$  - флуктуирующие силы, обусловленные взаимодействием со средой и диссипацией внутри системы.

Уравнения такого вида также описывают фазовые переходы, которые в соответствии с синергетической концепцией происходят в результате самоорганизации [5]. Процесс самоорганизации описывается тремя степенями свободы, отвечающими параметру порядка ( $\Pi$ ), сопряженному ( $C$ ) ему полю и управляющему ( $Y$ ) параметру [7].

Единственная степень свободы – параметр порядка, описывает только квазистатические фазовые переходы. В системах, значительно удаленных от состояния равновесия, каждая из указанных степеней свободы приобретает самостоятельное значение, а процесс самоорганизации складывается в результате конкуренции положительной обратной связи параметра порядка с управляющим параметром и отрицательной обратной связи с сопряженным полем [5, 6]. Поэтому, кроме релаксации к равновесному состоянию в течение времени  $\tau^p$ , при участии двух степеней свободы могут реализовываться как режим запоминания, так и автоколебания, а при участии трех – возможен переход в хаотическое состояние. В результате состояние технологической и эксплуатационной системы характеризуется несколькими режимами [7]:

1) релаксационным – при времени релаксации параметра порядка намного превосходящим времена релаксации остальных степеней свободы ( $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_Y^p$  и  $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_C^p$ );

2) с запоминанием – при переходе из неупорядоченного состояния в "замороженный" беспорядок и реализуемым в случае, когда время релаксации параметра порядка окажется намного меньше остальных времен ( $\tau_{\Pi}^p \ll \tau_Y^p$  и  $\tau_{\Pi}^p \ll \tau_C^p$ );

3) автоколебательным – при соизмеримости характерных времен изменения параметра порядка и управляющего параметра или сопряженного поля ( $\tau_{\Pi}^p \approx \tau_Y^p$  или  $\tau_{\Pi}^p \approx \tau_C^p$ );

4) стохастическим – возможным при соизмеримости характерных времен всех трех степеней свободы ( $\tau_v^p \geq \tau_{II}^p \geq \tau_c^p$ ).

Таким образом, при моделировании технологического и эксплуатационного наследования, возможно понижение размерности задачи описания передачи показателей качества до трех степеней свободы среды в процессах обработки и изнашивания изделия. Моделирование процессов передачи на основе синергетического подхода позволяет учитывать стабильность формирования параметров качества и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического и эксплуатационного процессов через использование обратных связей [3,8].

При анализе процессов изнашивания деталей машины и их сопряжений целесообразно рассматривать вектор [2]

$$\varphi(X, t) = [\xi_{u_1}(X, t), \dots, \xi_{u_i}(X, t), \dots, \xi_{u_n}(X, t)],$$

где  $\xi_{u_i}(X, t)$  – скорость изнашивания  $i$ -й детали (сопряжения) в момент времени  $t$  при нагрузочном воздействии  $X$  на узел машины.

Тогда принимается, что процесс изнашивания обладает последствием, если модуль и направление вектора  $\varphi(X, t)$  в момент времени  $t$  зависят не только от модуля и направления вектора  $X$  в данный момент времени, но и от модуля и направления вектора  $X$  в моменты времени  $\tau < t$ , а также от величины износа  $U$  трущихся поверхностей за отрезок времени  $[0, t]$ . Здесь  $U$  –  $n$ -мерный вектор:  $U = (u_1, \dots, u_i, \dots, u_n)$ ; у которого  $u_i$  – величина износа  $i$ -й детали [2,3]

$$u_i(t) = \int_0^t \xi_{u_i}(\tau) d\tau.$$

Для процесса изнашивания без последствия характерно то, что модуль и направление вектора  $\varphi(X, t)$  в момент времени  $t$  зависят от модуля и направления вектора  $X$  только в данный момент.

В зависимости от времени  $\tau_p$ , в течение которого сохраняются изменения процесса утраты работоспособности, связанные с предысторией эксплуатации изделия, различают два вида последствия: первого и второго рода [2,9]. Последствие первого рода характеризуется тем, что изменения в процессе утраты работоспособности изделия, обусловленные предысторией нагрузочного воздействия  $X$ , сохраняются в течение всего срока службы изделия  $\tau_d$ , т.е.  $\tau_p \geq \tau_d$ . Если  $\tau_p < \tau_d$ , то имеет место процесс с "затухающей памятью" – последствие второго рода.

Зависимости интенсивности изнашивания узлов трения машин от продолжительности работы  $t$  отличаются друг от друга видом связей между управ-

ляющим параметром - нагрузочным воздействием  $X$  и сопряженным с ним изнашиванием интенсивностью  $J$ .

Выбор параметра порядка  $N$  в каждом конкретном случае зависит от задач исследования (определения долговечности, сравнения износостойкости, оценки динамических свойств системы с учетом изнашивания ее элементов и др.), и не исключено, что для одной и той же детали, но для различных показателей, процесс утраты работоспособности может иметь или не иметь последствие при постоянной интенсивности изнашивания  $J$  трущихся поверхностей. Это обусловлено видом связи (линейной или нелинейной) между определяющим параметром  $N$ , по которому производится оценка ресурса работоспособности исследуемого изделия и накопленным износом  $U$  [2,3].

Рассмотрим различные связи между внешними воздействиями и параметрами системы  $f_n$ , а также между характеристиками процесса утраты работоспособности  $g_n$ .

**Модель процесса утраты работоспособности узлов трения без последствия.** В случае, когда сопряженная параметру порядка  $N$  интенсивность изнашивания  $J$  зависит только от величины нагрузочного воздействия  $X$ :

$$\begin{cases} J(t) = f_n(X(t)), \\ H(t) = g_n(X(t), U(t), t). \end{cases}$$

Если процесс изнашивания рассматривать как непрерывный стохастический процесс [10], то можно получить условие изнашивания без последствия. При постоянных условиях трения приращение износа  $U(\Delta t) = U(t + \Delta t) - U(t)$  не зависит от времени (процесс с независимыми приращениями), следовательно, скорость изнашивания  $\xi_u = dU/dt$  стационарна в период времени  $\tau$  [2,3].

5) Поэтому такой процесс изнашивания описывается режимом с запоминанием ( $\tau_n^p < \tau_y^p$  и  $\tau_n^p < \tau_c^p$ );

Однако процессы утраты работоспособности деталей в периоды приработки и катастрофического разрушения поверхностных слоев не могут быть описаны с помощью приведенных уравнений, так как интенсивности изнашивания  $J$  в эти периоды не являются постоянными, а зависят от величин накопленного износа  $U$  трущихся поверхностей.

**Модели процессов утраты работоспособности узлов трения с последствием первого рода.** В случаях, когда интенсивность изнашивания  $J$  зависит как от величины нагрузочного воздействия  $X$ , так и от величины накопленного износа  $U$ , к рассматриваемому моменту времени  $t$ :

$$\begin{cases} J(t) = f_n(X(t), U(t), t), \\ H(t) = g_n(X(t), U(t), t); \end{cases}$$

а при учете обратной связи нагрузочного воздействия  $X^*$  с износом  $U$ :

$$\begin{cases} J(t) = f_H(X^*(t), U(t), t), \\ H(t) = g_H(X^*(t), U(t), t), \\ X^*(t) = q_H(X(t), U(t), t). \end{cases}$$

Изменения в период времени  $\tau$  интенсивности изнашивания  $J$  трущихся сопряжений, при постоянном нагрузочном воздействии на входе технической системы  $X$  могут быть вызваны двумя группами причин [2,3]:

- не учитывающими обратную связь нагрузки  $X$  с износом  $U$ , такими как различие физико-механических свойств материала по глубине поверхностного слоя изделия, обусловленное технологией изготовления; старение смазочных материалов, приводящее к ухудшению их трибологических свойств, к изменению теплового режима работы сопряжения, а в некоторых случаях и к смене видов изнашивания трущихся поверхностей; увеличение в процессе эксплуатации концентрации абразивных частиц, продуктов износа и т.п.;

- учитывающие изменения зависимости  $q_H$  нагрузочного воздействия  $X^*$  на детали узла трения в результате износа сопряжения  $U$ , которые связаны с увеличением зазоров в трущихся сопряжениях; с трансформацией макрогеометрии поверхностей трения при изнашивании и короблении деталей; с изменением контактной жесткости подвижных стыков и др.

Рассматриваемые процессы утраты работоспособности с последствием первого рода относятся к процессам с сильной корреляцией, у которых существует определенная связь между величинами параметра порядка  $H_i(\Delta t)$  и  $H_{i+1}(\Delta t)$  даже при сравнительно больших  $\tau = t_{i+1} - t_i$ . Здесь  $H_i(\Delta t) = H(t_i + \Delta t) - H(t_i)$ ,  $H_{i+1}(\Delta t) = H(t_{i+1} + \Delta t) - H(t_{i+1})$ ,  $t_i < t_{i+1}$ .

Вследствие этого процессы утраты работоспособности, вызванные первой и второй группами причин, характеризуются автоколебательным ( $\tau_H^p \geq \tau_V^p$  или  $\tau_H^p \geq \tau_C^p$ ) и стохастическим ( $\tau_V^p \geq \tau_H^p \geq \tau_C^p$ ) режимами с двумя и тремя степенями свободы технической системы.

**Модель процесса утраты работоспособности узлов трения с последствием второго рода.** Последствие второго рода проявляется при изменении нагрузочного воздействия в виде особого переходного периода в изнашивании трущихся поверхностей [2,11]. В переходный период  $[t_0, t_1]$  интенсивность изнашивания  $J$  отличается от тех значений, которые она принимала при предыдущем уровне нагрузочного воздействия  $X_{i-1}$ , и от значения, соответствующего новому уровню  $X_i$ :

$$J(t) = \begin{cases} f_H(X_i, X_{i-1}, \dots, X_{i-n}, t), & t_0 \leq t \leq t_1, \\ f_H(X_i, t), & t > t_1. \end{cases}$$

Возникновение переходных периодов объясняется несколькими причинами [2,3]: эксплуатационной наследственностью материалов деформируемых в процессе трения поверхностных слоев деталей; изменением эпюры удельных давлений в зоне контакта деталей при переходе с одного уровня нагрузочного воздействия на другой и связанной с этим "вторичной приработкой" трущихся поверхностей; постепенным восстановлением соответствия между величиной нагрузочного воздействия и распределением смазки и продуктов износа на трущихся поверхностях.

Исходя из представлений о природе явлений последействия второго рода можно заключить, что с позиций вероятностного анализа [10] процессы изнашивания в переходные периоды  $[t_0, t_1]$  характеризуются сильной корреляционной связью между приращениями износа  $U_i(\Delta t)$  и  $U_{i+1}(\Delta t)$  [2,3].

В этой связи их следует рассматривать как релаксационные ( $\tau_{\text{н}}^p > \tau_{\text{у}}^p$  и  $\tau_{\text{н}}^p \gg \tau_{\text{с}}^p$ ) с характерным периодом  $[t_0, t_1]$ .

Таким образом, понижение размерности задачи описания передачи свойств изделий в технологических и эксплуатационных процессах производится путем выделения параметров порядка и определения режимов состояния системы. После этого на каждом из режимов целесообразно рассмотреть взаимосвязи основных показателей качества изделия с определяющим параметром порядка и условия их устойчивого формирования.

Показатели качества изделий машиностроения, являющиеся основными, делятся на две категории [1,3]: к первой относятся те, которые характеризуются наследственными явлениями, связанными со свойствами материалов изделий; ко второй – связанные с геометрическими параметрами их поверхностей.

Показатели обеих категорий в многосвязных технологических и эксплуатационных средах взаимно влияют друг на друга. Геометрические параметры изделий, такие как их конфигурации и размеры могут оказывать влияние на напряжения, распределяемые в материале основы и поверхностных слоях. И, наоборот, напряжения, формируемые в ходе технологических операций и стадий эксплуатации, могут с течением времени привести к изменениям геометрических параметров высокоточных деталей. Это свидетельствует о взаимной связи и обусловленности явлений, сопровождающих технологические и эксплуатационные процессы.

Наиболее полно наследование основных показателей качества раскрывается при рассмотрении последовательности процессов с синергетических позиций совместного действия технологических факторов при взаимном влиянии показателей [3,8].

Начальные показатели качества деталей машины на различных масштабных уровнях в процессе эксплуатации изменяются [2,3]. Исключение составляют остаточные напряжения и структура основного материала, которые могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей деталей. В большинстве случаев уже в период приработки существенно меняется шерохова-

тость и структура поверхностного рельефа, волнистость и структура поверхностных слоев детали изменяются при установившемся изнашивании, а геометрическая форма поверхности трения остается в пределах допускаемых значений, принятых при изготовлении, практически до конца службы узла трения, если оценка его работоспособности производится по параметрам точности.

При анализе точности формирования поверхности и других показателей качества обработки для каждого технологического метода находят условия реализации, определяемые коэффициентом  $m_i$ , учитывающим штатные условия (в частности – достижимые или экономически целесообразные условия обработки), и коэффициентом  $n_i$ , учитывающим условия, отличающиеся от штатных, а также иные условия, дополнительно характеризующие среду (базирование и закрепление заготовки, упругие характеристики элементов технологической системы и т.д.) [3].

Аналитическое определение коэффициентов  $m_i$  и  $n_i$  в настоящее время невозможно, поэтому они определяются статистической обработкой экспериментальных данных.

При определении значений  $m_i$  используются методики [3,11]: максимального пересечения множества входных и выходных значений показателей качества и усреднения границ диапазонов.

Установлено, что рациональная погрешность определения коэффициентов оперативного изменения показателей качества  $m_i$  обрабатываемых заготовок для методов абразивной обработки в среднем в 3 раза выше, чем для лезвийной, что свидетельствует о большей чувствительности соответствующих технологических сред к изменению условий реализации и состояния образующих их объектов [11].

Снижение чувствительности технологических и эксплуатационных сред к изменению условий реализации режимов производства и применения изделий позволяет с наименьшими затратами осуществлять направленное формирование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения.

Управление основными технологическими и эксплуатационными факторами с использованием статистических методов контроля позволяет обеспечить показатели качества изделий в пределах рекомендуемых значений.

Таким образом, на основе применения синергетической концепции сформирована математическая модель наследования показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения, описывающая различные режимы поведения при производстве и применении технических систем [1].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. Мн.: Наука и техника, 1977. – 256 с.
2. Ящерицын П.И., Скорынин Ю.В. Работоспособность узлов трения машин. Мн.: Наука и техника, 1984. – 288 с.
3. Технологические основы управления качеством

вом машин/ Васильев А.С., Дальский А.М., Клименко С.А и др. М.: Машиностроение, 2003. – 256 с. 4. Хейфец М.Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. Новополоцк: ПГУ, 2001. – 156 с. 5. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур. М.: Мир, 1979. – 279 с. 6. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. – 404 с. 7. Олемской А.И., Коплык И.В. Теория пространственно-временной эволюции неравновесной термодинамической системы // Успехи физических наук. 1995. Т.165, № 10. С.1105-1144. 8. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с. 9. Скорынин Ю.В. Ускоренные испытания деталей машин и оборудования на износостойкость. Мн.: Наука и техника, 1972. – 159 с. 10. Вероятностный анализ процесса изнашивания/ Х.Б. Кордонский, Г.М. Харач, В.Л. Артомоновский, Е.Ф. Непомнящий. М.: Наука, 1968. – 56 с. 11. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве/ А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. М.: МАИ, 2000. – 364 с.

*УДК 658.512:612.7:621.9+388.24*

**Ящерицын П.И., Хейфец М.Л., Точило В.С., Кусакин Н.А.**

## **МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ СОВМЕЩЕННОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКОЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Физико-технический институт НАН Беларуси*

*Минск, Беларусь*

*Полоцкий государственный университет*

*Новополоцк, Беларусь*

*Белорусский государственный институт*

*стандартизации и сертификации*

*Минск, Беларусь*

Повышение надежности и долговечности машин и их составных частей – главная цель предприятий, занимающихся разработкой технологий и организацией машиностроительного производства. Обеспечить высокое качество машин в процессе освоения технологий и организации производства можно за счет внедрения новых методов упрочнения и обработки деталей, сварки и сборки узлов машин и текущего контроля на технологических операциях [1–3].