

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; τ - 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 (Π), 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 τ^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 ($\tau_{\Pi}^p > \tau_Y^p$ и $\tau_{\Pi}^p > \tau_C^p$);

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 ($\tau_{\Pi}^p < \tau_Y^p$ и $\tau_{\Pi}^p < \tau_C^p$);

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

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 τ_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 τ_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 τ [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 τ 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 ($\tau_H^p \geq \tau_H^c$ или $\tau_H^p \geq \tau_H^c$) и стохастическим ($\tau_H^p \geq \tau_H^c \geq \tau_H^c$) 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 ($\tau_{\text{II}}^p > \tau_{\text{V}}^p$ и $\tau_{\text{II}}^p \gg \tau_{\text{C}}^p$) 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].