

УДК 658.512:621.9:621.8:621.7+536.75

Академик П. И. ЯЩЕРИЦЫН, М. Л. ХЕЙФЕЦ,
С. А. КЛИМЕНКО, А. С. ВАСИЛЬЕВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Физико-технический институт НАН Беларуси,
Полоцкий государственный университет,
Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля, Киев, Украина,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Россия

Поступило 27.01.2005

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 [5, 6].

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 [7]. 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 показателей уравнения группируются в универсальные классы вида [8]

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

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 [7]. Процесс самоорганизации описывается тремя степенями свободы, отвечающими параметру порядка (Π), сопряженному (C) ему полю и управляющему (Y) параметру [9].

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 [7, 8]. 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 [5, 6, 9]: 1) релаксационным — при времени релаксации параметра порядка намного превосходящим времена релаксации остальных степеней свободы ($\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\Psi}^p$ и $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\zeta}^p$); 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 ($\tau_{\Pi}^p \ll \tau_{\Psi}^p$ и $\tau_{\Pi}^p \ll \tau_{\zeta}^p$); 3) автоколебательным — при соизмеримости характерных времен изменения параметра порядка и управляющего параметра или сопряженного поля ($\tau_{\Pi}^p \approx \tau_{\Psi}^p$ или $\tau_{\Pi}^p \approx \tau_{\zeta}^p$); 4) стохастическим — возможным при соизмеримости характерных времен всех трех степеней свободы ($\tau_{\Psi}^p \approx \tau_{\Pi}^p \approx \tau_{\zeta}^p$).

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, 10].

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: $U = (u_1, u_i, \dots, u_n)$; 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 последствий: первого и второго рода [2, 11]. 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 (рис. 1) отличаются друг от друга видом связей между управляющим 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].

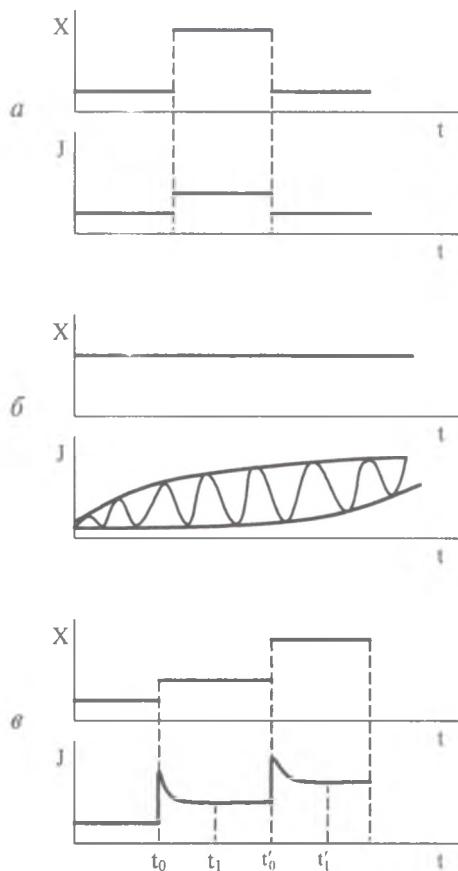


Рис. 1. Зависимости интенсивности изнашивания J узлов трения от длительности работы t . *а* — J зависит только от величины нагрузочного воздействия X в момент времени t ; *б* — J зависит от времени работы t при постоянном X ; *в* — J зависит от времени работы t при ступенчатом изменении X на отрезках времени $[t_0, t_1]$, $[t'_0, t'_1]$ и т. д.

Рассмотрим различные связи между внешними воздействиями и параметрами системы f_H , а также между характеристиками процесса утраты работоспособности g_H .

Модель процесса утраты работоспособности узлов трения без последействия (рис. 1, *а*). В случае, когда сопряженная параметру порядка H , интенсивность изнашивания J зависит только от величины нагрузочного воздействия X

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

Если процесс изнашивания рассматривать как непрерывный стохастический процесс [12], то можно получить условие изнашивания без последействия. 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].

Поэтому такой процесс изнашивания описывается режимом с запоминанием ($\tau_H^p \ll \tau_u^p$ и $\tau_H^p \ll \tau_c^p$)

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 последействием первого рода (рис. 1, *б*). 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

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

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]: 1) 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.; 2) 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 ($\tau_{\Pi}^p \approx \tau_{\Psi}^p$ или $\tau_{\Pi}^p \approx \tau_{\Sigma}^p$) и стохастическим ($\tau_{\Psi}^p \approx \tau_{\Pi}^p \approx \tau_{\Sigma}^p$). режимами с двумя и тремя степенями свободы технической системы.

Модель процесса утраты работоспособности узлов трения с последствием второго рода (рис. 1, в). 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 последствия второго рода можно заключить, что с позиций вероятностного анализа [12] 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 связи с этим их следует рассматривать как релаксационные ($\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\Psi}^p$ и $\tau_{\Pi}^p \gg \tau_{\Sigma}^p$) 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 [13]. 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, 10].

Начальные показатели качества деталей машины на различных масштабных уровнях (рис. 2) 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 шероховатость 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.

Показатель качества изготовления	Период процесса изнашивания		
	приработка	нормальное изнашивание	ускоренное изнашивание
Точность размеров и форма (нелпосконость, некруглость и др.)	[заштрихованный блок]		
Волнистость	[заштрихованный блок]		
Шероховатость	[заштрихованный блок]		
Остаточные напряжения	[заштрихованный блок]		
Структура основного материала	[заштрихованный блок]		
Структура поверхностных слоев	[заштрихованный блок]		
Структура поверхностного рельефа	[заштрихованный блок]		



Рис. 2. Схема изменения начальных показателей качества изделий в процессе эксплуатации (заштрихованные участки характеризуют длительность сохранения начальных значений геометрических параметров, остаточных напряжений и структуры материала в пределах допустимых отклонений)

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 [14].

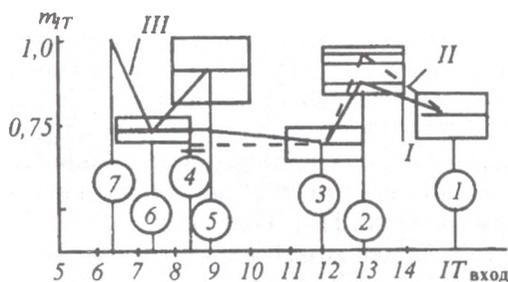


Рис. 3. Сравнение коэффициентов оперативного изменения точности размера (m_T) для методов обработки наружных цилиндрических поверхностей: 1—4 — точение черновое, получистовое, чистовое, тонкое; 5—7 — шлифование предварительное, окончательное, тонкое; I, III — методика максимального пересечения множества; II — методика усреднения границ

Авторы выражают признательность коллегам и ученикам академика П. И. Ящерицына, внесшим значительный вклад в развитие учения о технологической и эксплуатационной наследственности, на основе которых, с позиций явлений самоорганизации поверхностных явлений, получена единая модель математического описания передачи параметров качества изделий, представленная в данной работе.

Литература

1. Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Технологическая наследственность в машиностроении. Мн., 1977.
2. Ящерицын П. И., Скорынин Ю. В. Работоспособность узлов трения машин. Мн., 1984.
3. Васильев А. С., Дальский А. М., Клименко С. А. и др. Технологические основы управления качеством машин. М., 2003.
4. Хейфец М. Л. Формирование свойств материалов при послойном синтезе деталей. Новополоцк, 2001.
5. Витязь П. А., Кожуро Л. М., Филонов И. П., Хейфец М. Л. // Тяжелое машиностроение. 2004. № 7. С. 18—23.

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, 14]: максимального пересечения множества входных и выходных значений показателей качества и усреднения границ диапазонов (рис. 3).

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 [15] 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.

6. Я щ е р и ц ы н П. И., А в е р ч е н к о в А. И., Х е й ф е ц М. Л., К у х т а С. В. // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45, № 4. С. 106—109.
7. Э б е л и н г В. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур. М., 1979.
8. Х а к е н Г. Синергетика. М., 1980.
9. О л е м с к о й А. И., К о п л ы к И. В. // Успехи физических наук. 1995. Т. 165, № 10. С. 1105—1144.
10. Х е й ф е ц М. Л., К о ж у р о Л. М., М р о ч е к Ж. А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель, 1999.
11. С к о р ы н и н Ю. В. Ускоренные испытания деталей машин и оборудования на износостойкость. Мн., 1972.
12. К о р д о н с к и й Х. Б., Х а р а ч Г. М., А р т о м о н о в с к и й В. Л., Н е п о м н я щ и й Е. Ф. Вероятностный анализ процесса изнашивания. М., 1968.
13. Г о р д и е н к о А. И., К о ж у р о Л. М., Х е й ф е ц М. Л., К у х т а С. В. // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 4. С. 107—110.
14. Д а л ь с к и й А. М., Б а з р о в Б. М., В а с и л ь е в А. С. и др. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М., 2000.
15. Я щ е р и ц ы н П. И., Х е й ф е ц М. Л., Т о ч и л о В. С., К у с а к и н Н. А. // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 6. С. 113—118.

YASHCHERITSYN P. I., KHEIFETS M. L., KLIMENKO S. A., VASILIEV A. S.

**TECHNOLOGICAL AND OPERATION INHERITANCE OF QUALITY INDICES
IN THE SERVICE CYCLE OF PRODUCTS OF MECHANICAL ENGINEERING**

Summary

A mathematic model for the inheretance of quality indices of mechanical engineering products describing different behavior regimes at the production and usage of engineering systems was derived.