

УДК 621-2.002.2

В.П. Федоров, д.т.н., проф.
М.Н. Нагоркин, к.т.н., доц.
Е.В. Ковалева, к.т.н., доц.

Брянский государственный технический университет

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ В ТИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

В работе рассмотрены особенности эксплуатации функциональных поверхностей деталей в соединениях трения-скольжения машин и технологического оборудования и пространственно-временные модели силовых и скоростных факторов.

***Ключевые слова:** функциональные поверхности деталей, силовые факторы, скоростные факторы.*

Постановка проблемы. Недостатком технологического обеспечения эксплуатационных свойств соединений до недавних пор являлось требование однородности качества контактирующих поверхностей, которое обуславливалось жесткостью условий обработки в пределах перехода, связанных со спецификой работы технологического оборудования.

В процессе эксплуатации детали машин подвергаются воздействию комплекса факторов, компоненты которого в общем случае являются случайными величинами, что неизбежно влечет за собой (при однородности качества) анизотропию эксплуатационных свойств поверхности в целом. Наиболее ярким примером в этом плане является неравномерная "выработка" направляющих элементов типа трения скольжения (станины, планки, штанги и др.) технологического оборудования и оснастки. Эффект неравномерности "выработки" обусловлен взаимодействием однородности качества функциональных поверхностей с нестабильностью условий эксплуатации (нагрузки, скорости, временного фактора и др.). Результатом является потеря точности как одной из важнейших функций технологического оборудования и в лучшем случае – необходимость ремонта, а в худшем – его замены.

Для получения поверхностей с равномерными эксплуатационными свойствами рекомендуется использовать методы, позволяющие в процессе обработки варьировать такими управляющими факторами, как силовые (статические и динамические), кинематические (скорость, подача, направление), электрофизические (сила тока, скважность им-

пульсов, энергия излучения, перекрытие зон лазерного воздействия) и др.

Изложение основного материала. Процесс обработки поверхностей деталей при решении задачи адаптации поверхности к переменным условиям эксплуатации должен быть гибким, позволяющим обеспечить заданную неоднородность параметров качества, то есть закон их изменения в функциях координат поверхности. Такие задачи можно обеспечить при чистовой и финишной обработке поверхностей в технологических системах с компьютерным управлением (CNC, NCNC и др.), которые обладают повышенной гибкостью, обеспечивая заданный закон неоднородности поверхности по качеству за счет возможности управления режимами в пределах перехода. В связи с этим рассчитываются логические модели управления и принципы технологического обеспечения заданных законов изменения параметров качества по обрабатываемой поверхности, а также структурная модель обеспечения качества поверхностей деталей машин для эксплуатации в неоднородных условиях с использованием систем с ЧПУ и персональных компьютеров. Знание особенностей эксплуатации функциональных поверхностей трибоэлементов необходимо для оптимизации их обработки с целью обеспечения максимальной наработки до отказа по критерию равномерной износостойкости соединения, что является важным для узлов технологического оборудования и оснастки. Типовыми соединениями трения скольжения являются цилиндрические подшипники скольжения, плоские и цилиндрические направляющие механизмов с различными видами движения трибоэлементов, соединения "кулачок-толкатель" кулачковых механизмов. Под функциональной поверхностью трибоэлемента понимается поверхность, контактирующая с аналогичной поверхностью другого трибоэлемента и воспринимающая внешние воздействия в процессе эксплуатации (давление, скорость относительного скольжения, смазка, температура и др.), которые необходимо учитывать при разработке технологического процесса обработки функциональных поверхностей.

Цилиндрический подшипник трения скольжения, трибоэлементами которого являются вал 1 и вкладыш 2, может работать по схемам: 1) вращается вал – вкладыш неподвижен (рис. 1, *a*); 2) вращается вкладыш – вал неподвижен (рис. 1, *б*).

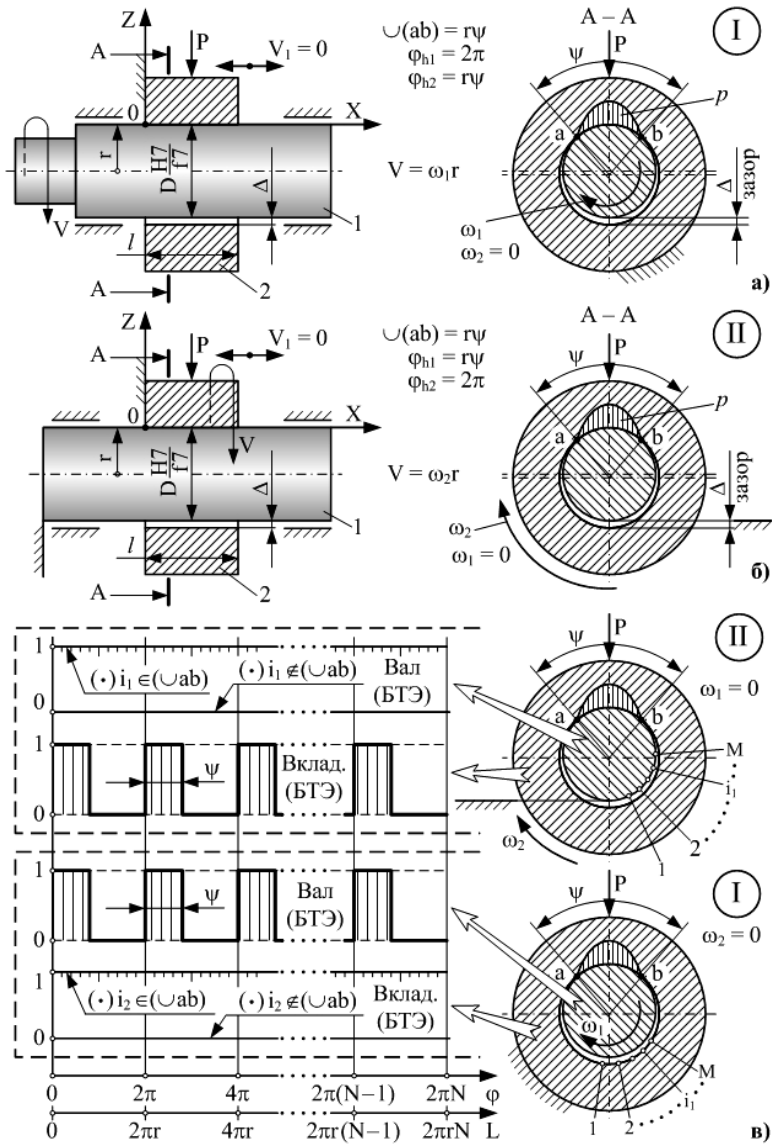


Рис. 1. Модели триботехнических систем типа цилиндрических подшипников скольжения (а, б) и диаграммы процессов контактирования трибоэлементов (в)

Принципиальное отличие рассматриваемых схем заключается в том, что при подвижном вале, вращающемся с угловой скоростью ω_1 , его поверхность изнашивается равномерно по окружности, а поверхность вкладыша только в пределах $\cup(ab)$, длина которой зависит от ψ . Неподвижные точки поверхности вала, находящиеся в пределах $\cup(ab)$, постоянно контактируют с поверхностью вращающегося вкладыша, что определяет неравномерный износ вала, имеющий вид "выработки" по дуге $\cup(ab)$ с центральным углом ψ .

Таким образом, имеющие одинаковое конструктивное исполнение трибоэлементы в двух рассмотренных случаях будут отличаться по эксплуатационным свойствам, в частности по характеру и величине износа.

При рассмотрении трибоэлементов в неподвижной системе координат XOZ (рис. 1), их можно классифицировать как: 1) базовый трибоэлемент (БТЭ) с постоянной ориентацией в выбранной системе координат (невозможность перемещения вдоль осей X , Y , Z и вращения вокруг осей OX , OY , OZ); 2) мобильный трибоэлемент (МТЭ), характеризуемый наличием одной или нескольких степеней подвижности.

Триботехнические характеристики МТЭ и БТЭ (величина износа, коэффициент трения и др.) определяются рядом технологических и эксплуатационных факторов (путь трения).

На рисунке 1, в представлены диаграммы процессов контактирования трибоэлементов, представляющие зависимость наличия (1) или отсутствия (0) контакта между элементарными точками поверхностей от угла поворота φ МТЭ. Здесь 2π – один рабочий цикл МТЭ (1 оборот), N – общее число циклов (число оборотов МТЭ), L – путь, который проходит элементарная точка МТЭ при вращении с угловой скоростью ω_1 (или ω_2), т. е.

$L = 2\pi r N$. Это максимально возможный путь трения для элементарной точки i поверхности трибоэлемента, находящейся в непрерывном контакте с поверхностью второго трибоэлемента, вращающегося с угловой скоростью ω за N циклов.

Из диаграмм видно, что непрерывный контакт с сопряженной поверхностью 1 характерен для элементарных точек i поверхности БТЭ, принадлежащих дуге $\cup(ab)$ с центральным углом ψ . Точки, принадлежащие $\cup(ab)$ с углом $(2\pi - \psi)$, в зону контакта не входят (0). В случае I – это вкладыш, в случае II – вал. Элементарные точки МТЭ периодически контактируют с поверхностью БТЭ, причем длительность контакта определяется длиной дуги $\cup(ab)$ и угловой скоростью ω , а путь

трения за один цикл составляет длину $\cup(ab)$, тогда общий путь трения элементарной точки МТЭ за N циклов составит $L_{MTЭ} = l_{\cup(ab)}N = r\psi N$ при линейной скорости относительного скольжения $V = \omega r$.

Для рассмотрения триботехнической системы "подшипник скольжения" путь трения элементарных точек радиального сечения поверхности за N циклов работы (число оборотов) значительно меньше пути соответствующих точек (участвующих в контакте) базового трибоэлемента в $(2\pi/\psi)$ раза. Кроме этого, поверхность МТЭ подвержена равномерному изнашиванию, а для БТЭ характерна так называемая "выработка" (местное изнашивание).

В технологических системах широко применяются цилиндрические опоры трения скольжения одновременно вращательного и возвратно-поступательного движения (рис. 2), например задняя и передняя направляющие инструмента для обработки отверстий в заготовках на расточных станках и автоматических линиях.

Корпус борштанги 1 является мобильным трибоэлементом 2-го рода, так как в неподвижной системе координат XOZ имеет две степени подвижности: вращение со скоростью V вокруг оси OX и перемещение вдоль оси OZ со скоростью подачи D_s . Вкладыш 2 задней направляющей является БТЭ. Особенность этой трибосистемы – вращение вектора реакции опоры 2 (вкладыша) R_i вокруг оси с угловой скоростью $\omega = 2V/D$, в соответствии с положением в каждый момент времени резцового блока 3 при обработке заготовки 4. Это обстоятельство гарантирует равномерный контакт всех точек вкладыша (а, значит, и его равномерный износ) с поверхностью МТЭ-2 – корпусом борштанги.

Диаграмма продолжительности контакта точек поверхности корпуса 1 с поверхностью вкладыша 2 представляет собой трапецию $aefb$, длины оснований которой ab и ef зависят от соотношения размеров l , l' и L . Участок ef ограничивает зону поверхности корпуса борштанги, все точки которой имеют максимальную продолжительность контакта с вкладышем за 1 цикл работы, так как проходят участок $cd = l$ полностью 2 раза (рабочий и холостой ход).

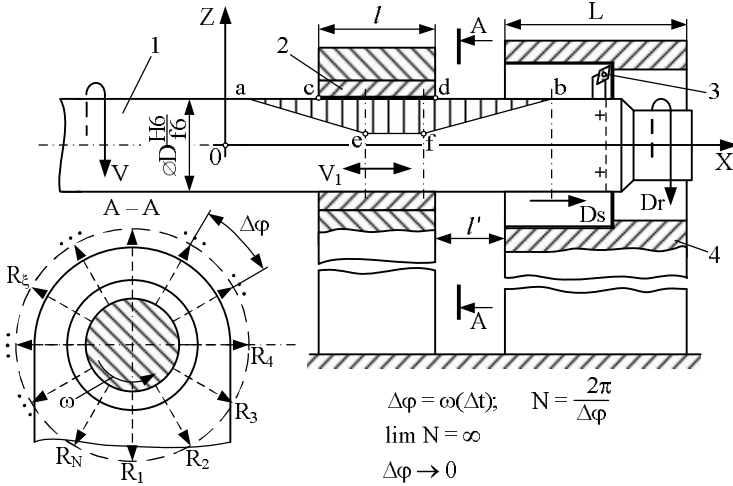


Рис. 2. Модель опоры трения скольжения задней направляющей борштанги при обработке отверстий:
 1 – корпус борштанги (МТЭ); 2 – вкладыши подшипника скольжения (БТЭ); 3 – расточной блок; 4 – заготовка

Со стороны вкладыша создается максимальное давление на корпус борштанги, которое всегда противоположно положению резового блока, поэтому процесс изнашивания будет не симметричным, а одно-сторонним. Эти особенности необходимо учитывать при изготовлении корпуса 1, чтобы обеспечить его равномерный износ и, следовательно, стабильность точности обработки деталей 4 (рис. 2).

Широкое распространение в технологии машиностроения получили цилиндрические направляющие трения скольжения возвратно-поступательного движения (рис. 3).

Скалка 1 является БТЭ в случае, представленном на рисунке 3, а. Мобильный трибоэлемент (МТЭ) 2 в этом случае может иметь как одну (V_1), так и две (V_1 и V) степени подвижности. Рисунок 3, б иллюстрирует случай, когда мобильным трибоэлементом является скалка 1, которая совершает лишь возвратно-поступательное движение относительно вкладыша 2 (БТЭ). Такие схемы весьма характерны для скалчатых кондукторов и направляющих элементов оснастки в автоматических линиях при обработке отверстий.

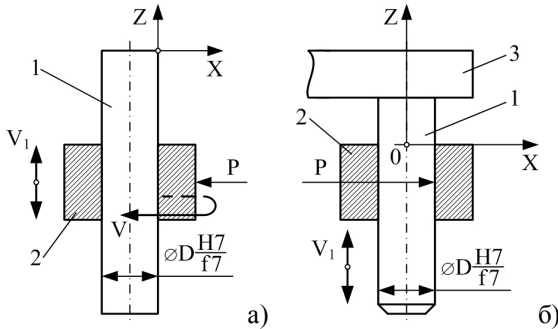


Рис. 3. Схемы трибосистем цилиндрических направляющих трения скольжения возвратно-поступательного движения

Для этих случаев при любых условиях эксплуатации наибольшей интенсивностью отличается процесс контактирования поверхности вкладыша 2, элементарные точки которой находятся в непрерывном контакте с поверхностью скалки 1. Диаграмму продолжительности контакта для элементарных точек поверхности скалки 1 можно без труда построить аналогично рисунку 2, зная технологические параметры работы приспособления (скалчатый кондуктор) или соответствующей позиции автоматической линии. В последнем случае цикл работы отличается высокой ритмичностью.

На рисунке 4 представлена схема триботехнической системы опоры

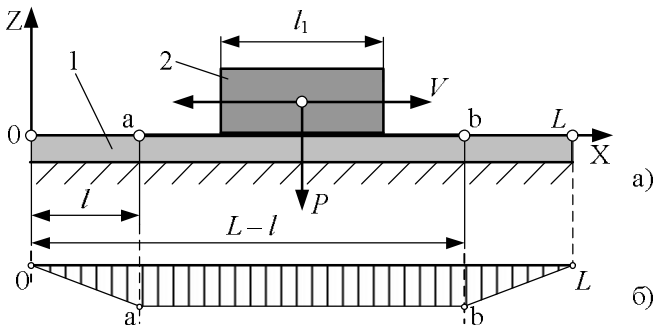


Рис. 4. Схема триботехнической системы опоры трения скольжения прямолинейных плоских направляющих (а) и эюра интенсивности контактного взаимодействия для элементов поверхности БТЭ (б)

ры трения скольжения плоских направляющих, к которым относятся направляющие станин металлорежущих станков, технологической оснастки и др. Формы поверхностей трения могут быть самыми различными, что определяется назначением и технологическими особенностями оборудования.

В таких парах трения МТЭ 1 совершает возвратно-поступательное движение относительно БТЭ 2, которым является в большинстве случаев станина. Определение действующей нагрузки P является при заданных конструктивно-технологических особенностях МТЭ 1 (суппорта, каретки и др. элементов) одной из типовых задач теоретической механики.

При возвратно-поступательном движении МТЭ 1 в пределах от 0 до L наиболее нагруженными элементарными точками направляющей (БТЭ 2) являются те, которые находятся в пределах отрезка ab (рис. 4, б). В то же время все точки функциональной поверхности МТЭ 1 находятся в непрерывном контакте с поверхностью БТЭ 2.

Диаграмма продолжительности контакта элементарных точек БТЭ с поверхностью МТЭ представляет собой трапецию $0abL$, аналогичную ранее рассмотренной (рис. 2). Отрезку ab принадлежат наиболее нагруженные точки БТЭ, то есть основания 2 (станины).

Представленный анализ показывает, что для обеспечения равномерного износа направляющих элементов технологического оборудования и оснастки при разработке технологии обработки функциональных поверхностей деталей необходимо учитывать особенности воздействия на них эксплуатационных факторов, в частности нагрузки, формировать соответствующие параметры их качества программным способом в процессе обработки.

Анализ работ по технологическому обеспечению износостойкости трибоэлементов показывает, что нередко авторы рассматривают параметры эксплуатации (P – давление на единицу площади проекции опорной поверхности; V – скорость относительного скольжения трибоэлементов) как постоянные величины, стабильные в пространственно-временной области и имеющие фиксированные минимальные и максимальные значения.

Для возвратно-поступательных пар трения скольжения, включающих широкий класс направляющих технологического оборудования и оснастки (от призматических до цилиндрических), характерно изменение нормальной нагрузки P и скорости относительного скольжения V , как функций, непрерывно изменяющихся в пространстве и времени.

Временные зависимости для нагрузки P на трибосистему можно

охарактеризовать следующими случаями (рис. 5).

Случай 1. Нагрузка P постоянна во времени ($P = P_0 = \text{const}$). В этом случае производная $dP/dt = 0$. Это наиболее простой идеальный случай.

Случай 2. Нагрузка P , изменяющаяся по синусоидальному закону $P = P_0 + \Delta p \sin \omega t$, где P_0 – номинальное значение нагрузки; Δp – ее амплитудное значение; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота (f – частота в герцах).

Технологическое обеспечение триботехнических характеристик для этого случая рассмотрено в работах [2 и др.].

Случай 3. Нагрузка P имеет импульсивный характер, оцениваемый величинами: P_0, P_m – минимальное и максимальное значение нагрузки; T, τ – период и длительность импульса; $c = T/\tau$ – скважность импульса.

Случай 4. Нагрузка P изменяется от нуля до номинального значения P_0 по закону треугольника с периодом T и длительностью импульса τ . Скважность определяется величиной $c = T/\tau$ и нагрузка приближается к идеальной ударной при $\tau \rightarrow 0$.

Случай 5. Случай трапецеидального закона изменения нагрузки P , которая может принимать значение от P_1 ($P = P_1 = \text{min}$) до P_0 , с периодом T_p . Можно выделить четыре фазы воздействия на номинальную площадь контакта поверхностей трибоэлементов: t_n – время нагружения от P_0 до P ; t_m – время воздействия максимальной нагрузки $P = P_0$; t_p – время разгрузки от P_0 до P_1 ; t_e – время выстоя соединения под нагрузкой P_1 .

Случай 6. Нагрузка P принимает значения от P_1 до P_0 в детерминированных временных интервалах t_n, t_m, t_p, t_e , аналогичных рассмотренным в случае 5. Отличительная особенность этого случая – непостоянство производной функции нагрузки от времени в пределах каждого из отмеченных временных интервалов, то есть $dP/dt = \text{const}$. Теоретически в этом случае, как и в предыдущем, можно допустить, что $P_1 = 0$.

Случай 7. Нагрузка P представляет собой стационарную случайную функцию от времени. Ее математическое ожидание $M\{P\}$ соответствует номинальному значению P_0 . Величина σ_p – среднее квадратичное отклонение сечения ансамбля реализаций в момент времени t_i . Такой закон изменения нагрузки во времени является наиболее общим для стационарных условий, так как в процессе эксплуатации соединений всегда имеют место случайные факторы, изменяющие величины нагрузки [3].

Случай 8. Математическое ожидание нагрузки является функцией времени, то есть зависимость нагрузки от времени является нестационарной.

нарным случайным процессом. В этом случае параметры нагрузки, являющиеся характеристиками нестационарного случайного процесса, можно определить только осреднением мгновенных значений по ансамблю выборочных функций, формирующих процесс [3].

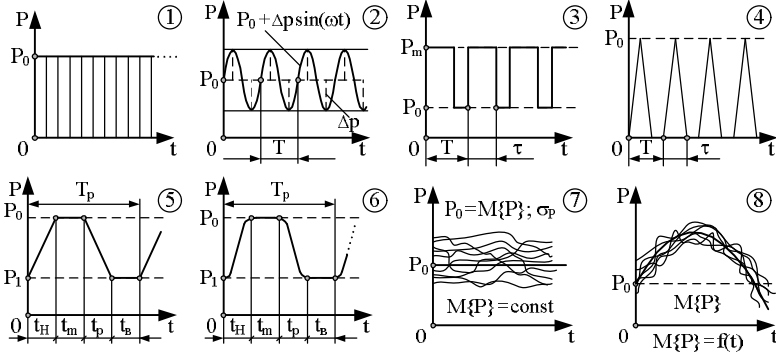


Рис. 5. Законы изменения нагрузки P на трибосистему во временной области

Характерные законы изменения скорости относительного скольжения трибоземента во временной области показаны на рис. 6 и характеризуются следующим образом.

Случай 1. Скорость постоянна, ускорение равно нулю, то есть $\omega = \text{const}$, $d\omega/dt = 0$ и $V = (\omega D/2) = \text{const}$. Это наиболее простой случай, аналогичный для нагрузки P_1 .

Случай 2. Изменение скорости V во времени протекает по трапецидальному закону от величины $V_1 = V_{\min}$ до $V_0 = V_{\max}$ с периодом T_v . Как в случае 5 для нагрузки (рис. 5) для скорости V характерны четыре фазы воздействия на трибосистему: t_1 – время для разгона от величины V_1 до V_0 (скорость V_0 достигается в период пуска длительностью t_0 , который на схеме не показан); t_2 – время работы трибосистемы на максимальной скорости V_0 ; t_3 – время замедления скорости от V_0 до V_1 ; t_4 – время работы при минимальной скорости V_1 . Если $V_1 = 0$, то работа соединения происходит в режиме "старт-стоп" и в этом случае $t_0 = 0$, а время t_4 представляет собой время выстоя (длительность остановки).

Случай 3. Отличие данного закона от трапецидального заключается в том, что в периоды времени t_1, t_2 зависимость скорости от времени отличается от прямолинейной, то есть если в случае 2 ускорение на этих участках было постоянным и отличным от 0 ($d\omega/dt = \text{const} \neq 0$), то

в этом случае $d\omega/dt = Var$ (работа с переменным угловым ускорением). Как и в предыдущем случае, при $V_1 = 0$ трибосистема работает в режиме "старт-стоп" со временем выстоя t_4 .

Случай 4. Величина скорости представляет собой стационарную случайную функцию времени с математическим ожиданием $V_0 = M\{V\}$ и дисперсией $D\{V\}$ [3].

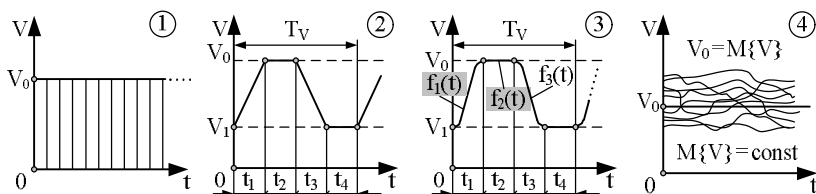


Рис. 6. Законы изменения скорости относительного скольжения V трибозлементов во временной области

Наиболее общим законом изменения нагрузки P в пространственной области является трапецеидальный (случай P1, рис. 7), для которого характерны участки нагружения ax_1 , работы под максимальной нагрузкой P_0 (участок x_1x_2) и разгрузки x_2b . При этом зависимости изменения нагрузки в пространстве координаты поверхности базового трибозлемента X могут описываться различными уравнениями для различных участков, например, $f_{p1}(x)$, $f_{p2}(x)$ и $f_{p3}(x)$, аналитический вид которых определяется спецификой работы соединения.

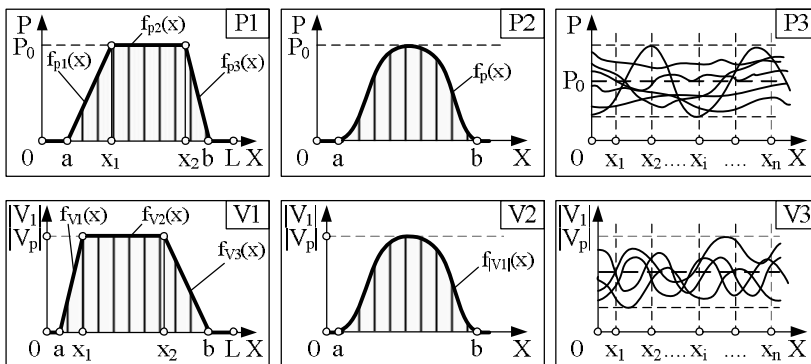


Рис. 7. Типовые законы изменения нагрузки P и скорости относительного скольжения V в пространственной области

для пар трения типа направляющих скольжения

Более простым в этом плане является случай P2 (рис. 7), когда зависимость $f_p(x)$ является непрерывной дифференцируемой функцией, имеющей общее аналитическое описание.

Случай P3 (рис. 7) – это зависимость нагрузки P в виде стационарного случайного процесса в функции координаты X . Она аналогична рассмотренной стационарной случайной функции от времени (случай 7, рис. 5).

При рассмотрении скорости V относительного скольжения трибоэлементов следует иметь в виду ее абсолютное значение, так как специфика работы направляющих скольжения технологического оборудования и других машин определяет ее знакопеременность. Наиболее общим также является трапецеидальный закон зависимости скорости мобильного трибоэлемента от координаты рассматриваемой точки базового трибоэлемента (случай V1, рис. 7). Схема отражает наличие участка разгона ax_1 , участка x_1x_2 работы трибосистемы со скоростью, близкой к максимальной (возможны случайные флуктуации), и участка торможения x_2b .

Случай V2 (рис. 7) характеризуется возможностью интерпретации зависимости скорости мобильного трибоэлемента $|V_1|$ от текущей координаты X рассматриваемой точки базового трибоэлемента непрерывной дифференцируемой аналитической функцией.

Скорость $|V_1|$ может представлять собой стационарную случайную функцию от координаты X (случай V3, рис. 7), что характерно при движении трибосистем на малых скоростях, когда возможны случаи торможения и ускорения, например, в связи с процессами схватывания.

Влияние технологических факторов обработки на триботехнические характеристики пары трения сказываются через размерные параметры сопряжения, например через формируемый зазор ($\delta = D - d$), геометрические параметры качества поверхностей мобильного и базового трибоэлементов R , W , H (шероховатость, волнистость и макроотклонения) и физико-механические свойства H_μ , σ (микротвердость и остаточная напряженность). Материалы вала M_1 и вкладыша M_2 , а также покрытия P_1 и P_2 (материал, количество слоев, способы нанесения, параметры и др.) можно отнести к конструкторским или конструкторско-технологическим факторам. Эти характеристики в комплексе с внешними факторами эксплуатации определяют характер контактного взаимодействия при граничном трении, а значит и триботехнические

характеристики: время t_0 и путь приработки L_{01} , L_{02} , величины начального износа h_{01} , h_{02} , коэффициент трения в начале f_1 и в конце f_0 приработки, величину контактной податливости соединения, определяющую точность технологического оборудования и оснастки и др.

Обобщенная пространственно-временная эпюра внешних возмущающих воздействий на соединения трибоэлементов (складывается из 4-х участков (рис. 8, а)) представляет собой зависимости нагрузки ($Y = P$) или скорости относительного скольжения ($Y = V$) от времени работы ($X = t$) или координаты поверхности ($X = Z$). Таким образом, она является характерной для четырех зависимостей, имеющих место на практике: $P = f(t)$; $P = f(L)$; $V = f(t)$; $V = f(Z)$.

По оси абсцисс обобщенная эпюра имеет четыре характерных участка (рис. 8, а).

Участок 1: $0x_a = X_1$ – участок нагружения (для P) или разгона (для V) длиной X_1 до достижения соответствующих значений $Y = Y_0$. Нагружение или разгон могут осуществляться как от $Y = 0$, так и от какой-то исходной величины $Y = Y_0$. В общем случае аналитическая зависимость для участка $0x_a$ активации величины Y имеет вид непрерывной возрастающей функции $Y = f_1(x)$.

Участок 2: $x_a x_b = X_2$ – участок номинальных возмущающих воздействий, подчиняющихся закону $Y = f_2(x)$, вид которого зависит от особенностей и условий эксплуатации конкретной трибосистемы.

Участок 3: $x_b x_e = X_3$ – участок разгрузки (для $Y = P$) или замедления ($Y = V$), где имеет место закон $Y = f_3(x)$, отличающийся снижением величины Y от Y_0 до Y_1 или до 0.

Участок 4: $x_e x_d$ – участок выбега, характерный воздействием минимальной нагрузки или скорости относительного движения в трибосистеме. Как правило, величина Y в пределах этого участка подчиняется закону $Y = f_4(x) = Y_1 = \text{const}$.

Обобщенная эпюра имеет период $T = X_1 + X_2 + X_3 + X_4$, причем длительность отдельных составляющих периода может быть равной нулю.

В зависимости от этого, а также от вида функций $f_1(x)$, ..., $f_4(x)$ обобщенная эпюра возмущающих воздействий вырождается в частные, некоторые из которых показаны на рисунке 8, б.

Так, при $X_1 = X_3 = X_4 = 0$ ($T = X_2$) и $f_2 = Y_0 = \text{const}$ наблюдается постоянное стабильное возмущающее воздействие $P = Y_0 = \text{const}$ (или $V = Y_0 = \text{const}$) как во временной (t), так и в пространственной (Z) областях (1, рис. 8, б).

Импульсный характер возмущающих воздействий (2, рис. 8, б) наблюдается при условиях, если $X_3 = X_4 = 0$; $f_2(x) = Y(x) = Y_0$, если $X \in ((i-1)T; (i-1)T + \tau)$, $i = 1, N$; или $f_2(x) = Y(x) = Y_1$, если $X \notin ((i-1)T; (i-1)T + \tau)$, $i = 1, N$.

При $Y_1 = 0$ получается классическое импульсное воздействие со скважностью импульса $c = T/\tau$ (3, рис. 8, б).

Широко распространенный синусоидальный закон изменения внешних возмущающих воздействий (4, рис. 8, б), принятый при исследованиях динамики трибосистем наблюдается при условиях: $X_1 = X_3 = X_4 = 0$; $f_2(x) = Y(x)$.

Величины Y_0 , ΔY и T задаются в исходных данных при проведении исследований или определяются, исходя из реальных условий эксплуатации.

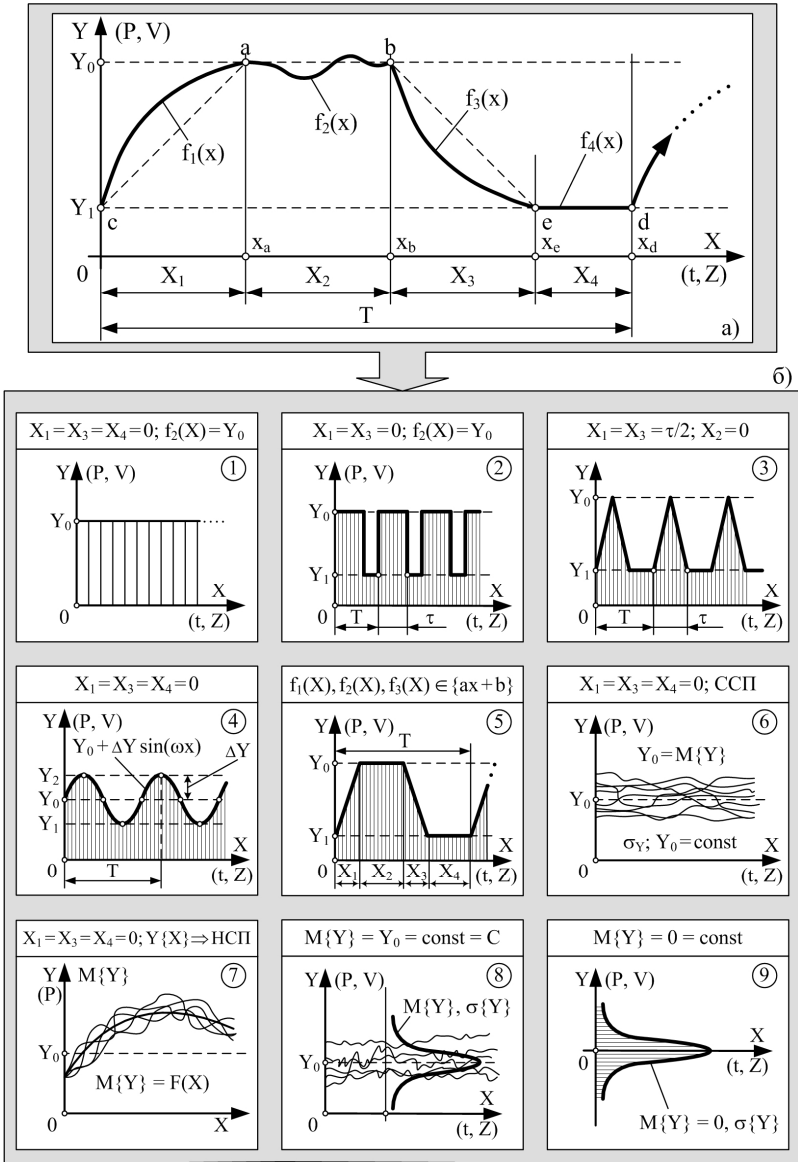


Рис. 8. Эпюры распределения внешних воздействий на триботехнические системы в пространственно-временной области: а – обобщенная эпюра; б – типовые случаи вырождения обобщенной эпюры в частные

Обобщением постоянного стабильного возмущающего воздействия (1, рис. 8, б) является случай, когда $X_1 = X_3 = X_4 = 0$, а на протяжении X_2 функция $Y(x_2) = f_2(x)$ представляет собой стационарный случайный процесс, обладающий эргодическим свойством. Он имеет математическое ожидание $M\{Y\} = Y_0$ и дисперсию $\sigma^2\{Y\}$. Такой случай (6, рис. 8, б) является наиболее характерным для реальных условий, и он наблюдается как для нагрузок, так и для скоростей относительного скольжения [1].

Наиболее общим является трапецеидальный закон приложения внешних возмущающих воздействий (5, рис. 8, б). Для него характерно наличие всех четырех составляющих X_1, X_2, X_3, X_4 периода T . При допущении, что функции $f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)$ линейны, такой закон выполняется при следующих условиях: $f_1(x), f_2(x), f_3(x) \in R(a_i + b_i x), i = 1 \dots 3; X_1 > 0; X_2 > 0; X_3 > 0; X_4 > 0; f_4(x) = Y = \text{const}$.

Этот закон является простой и в то же время достаточно обобщающей моделью реально действующих возмущений как силового, так и скоростного характера.

Определенный интерес представляет определение обобщенного параметра pV в стационарных областях функционирования трибологической системы $X_2 = X_b + X_a$ и $X_4 = X_d + X_c$ (в том случае, если $Y_p = 0$). В этом случае можно выделить из рассмотренных (рис. 8) три типовых эпоры зависимости факторов P и V от пространственно-временных координат X (Z или t):

1 – возмущающие воздействия отличаются постоянством и стабильностью (идеальный случай);

4 – эпора возмущающих воздействий моделируется в виде синусоиды (или суммы синусоид), имеющих переменный, но детерминированный характер;

8 – возмущающие воздействия носят случайный характер, представляя собой реализации стационарного случайного процесса для каждого рассматриваемого цикла и имеющие математическое ожидание $M\{Y\}$ и дисперсию $D\{Y\}$, не зависящие от X .

К этим трем типовым эпорам предлагается ввести эпору 9 – случайного возмущения, представляющего собой стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием $M\{Y\} = 0$ и дисперсией $D\{Y\}$.

Введение вспомогательной эпоры D позволяет упростить описание механизма формирования возмущений случайного характера. Так, эпору 8 можно представить суммой эпор 1 и 4, а процесс $Y = [Y_0 + \Delta Y \sin(\omega x)]$ с эпорой 9 является математической моделью случайного

возмущения с изменяемым по закону синуса математическим ожиданием, имеющим амплитуду $\Delta Y = Y_0$.

Вывод. Результаты пространственно-временного моделирования силовых и скоростных факторов в парах трения скольжения деталей машин и технологического оборудования показывают, что существуют как простые, так и сложные модели их распределения по поверхности контактирования трибоэлементов. Это говорит о том, что эксплуатационные свойства поверхности со стационарным (стабильным) качеством будут нестационарны в функции ее координат. Следовательно, для обеспечения стационарности эксплуатационных свойств в координатах функциональной поверхности необходимо обеспечивать параметры ее качества по закону, соответствующему конкретной модели действующих силовых и скоростных факторов. Этого можно достичь программным управлением формирования параметров качества поверхностного слоя по заданному закону в процессе обработки.

Список использованной литературы:

1. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол : пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
2. Федоров В.П. Технологические и метрологические аспекты адаптации поверхностей деталей машин к нестационарным условиям эксплуатации в процессе изготовления / В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин, И.Л. Пыриков // Справочник. Инженерный журнал. – № 10. – 2009. – С. 8–15.
3. Федоров В.П. Технологическое обеспечение закономерного изменения параметров качества поверхности детали в процессе обработки : монография / В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин, Е.В. Ковалева. – Брянск : БГТУ, 2012. – 192 с.

ФЕДОРОВ Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры "Технология машиностроения" Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– параметрическая надежность технологических систем.

Тел.: (4832) 58–82–20.

НАГОРКИН Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры "Безопасность жизнедеятельности и химия" Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– надежность технологического обеспечения параметров качества деталей машин.

Тел.: (4832) 58–82–34.

E-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru.

КОВАЛЕВА Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры "Машиностроение и материаловедение" Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– надежность технологического обеспечения параметров качества деталей машин.

Тел.: (4832) 56–14–01.

Статья поступила в редакцию 28.05.2012

