

1st International Conference - Reliability and Durability
of Machines and Machinery Systems in Mining
1986 JUNE 16-18 SZCZYRK, POLAND

Владимир ГРИБ

Институт повышения квалификации руководящих
работников и специалистов Минстройдормаша
Москва, СССР

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗНОСА УЗЛОВ ТРЕНИЯ МАШИН КАК СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Резюме. В статье подчеркивается неэффективность традиционных методов прогнозирования узлов трения машин как сложных триботехнических систем.

Стратегия решения триботехнических задач, методологический подход к прогнозированию поведения узлов трения должны соответствовать сложным многофакторным системам.

Среди задач, решаемых конструкторами-машиностроителями, особое внимание должно быть уделено задаче прогнозирования функционирования и изнашивания узлов трения, т.е. задаче изменения их состояния.

На примере формы детали, одного из параметров, отвечающих за работоспособное состояние узлов трения, в статье представлен процесс формизменения детали.

Подчеркивая невозможность решения эволюционных, с распределенными параметрами и обратными связями задач в замкнутой форме, автор рассматривает возможность их решения путем дискретизации исследуемой системы во времени и пространстве и обращения к численным методам.

Рассмотренные в статье теоретические предпосылки легли в основу разработанных программ расчета на износ разнообразных узлов трения.

Прогнозирование износа узлов трения машин и оборудования на этапе их проектирования обеспечивает создание долговечной конструкции, подбор оптимальных сочетаний конструктивных и смазочных материалов, выбор оптимально-го конструкционного решения и режимов эксплуатации.

Узлы трения машин представляют собой сложные триботехнические системы. Их сложность обусловлена следующими свойствами: динамичностью входных (режимных) и выходных (отвечающих за их функциональное назначение) параметров, изменением во времени структуры и свойств системы (формоизменением деталей, изменением износостойких свойств материалов, перемещением сопряженных деталей друг относительно друга и т.д., обратной связью входных и выходных параметров; распределенностью параметров, характеризующих состояние узлов трения (формы деталей, температуры, напряжений, деформаций); множеством взаимосвязанных и одновременно протекающих процессов (кинематичес-

ких, механических, теплофизических, гидродинамических и т.д.). Триботехнические системы по своей природе стохастичны.

Поэтому, традиционные методы, основанные на поочередном изучении влияния факторов-аргументов на износ, оказываются неэффективными при исследовании триботехнических систем. Вопросам расчета деталей и узлов трения машин посвящены работы [1-8 и другие].

Стратегия решения триботехнических задач, методологический подход к прогнозированию поведения узлов трения должны соответствовать сложным многофакторным системам. Изучение таких систем включает в себя следующие основные этапы: анализ структуры системы (совокупности элементов и протекающих в системе элементарных процессов, связей между ними), разработка операторов элементарных процессов (их математическое описание), разработка оператора системы в целом, преобразующего входные параметры в параметры выхода (алгоритма поведения системы), программирование и реализация решения с помощью ЭВМ (математический эксперимент) [9-15 и другие].

Декомпозиция системы на элементы зависит от поставленной задачи и глубины проникновения в объект исследования [13, 16]. В рамках задач, решаемых конструктором-машиностроителем, к элементам узлов трения следует отнести: детали, составляющие узел, смазочный материал, процессы относительного движения и взаимодействия деталей (кинематика и динамика узла), процессы изменения напряженно-деформационного и температурного состояния деталей, формоизменение деталей при изнашивании, гидродинамика смазки (в случае жидкостного трения). Более глубокий в иерархическом аспекте анализ узлов трения выходит за рамки возможности конструктора. Математическое описание перечисленных элементарных процессов в дифференциальной форме известно.

Задача прогнозирования функционирования и изнашивания узлов трения представляет собой задачу изменения их состояния. Состояние узла описывается совокупностью следующих показателей: формой деталей, их взаимным расположением, законом относительного движения, полями температуры, напряжений и деформаций. Состояние узлов трения в процессе эксплуатации изменяется от начального, закладываемого в проект и реализуемого в процессе производства до предельного значения, регламентированного техническими условиями по эксплуатации.

Одним из основных параметров, отвечающих за работоспособное состояние узлов трения является форма деталей. Эта форма меняется при изнашивании. Процесс формоизменения можно интерпретировать в виде поля, представляющего собой пространство Ω изнашиваемого материала, в каждой точке которого определена векторная величина \vec{v} - скорость изнашивания (рис. 1) [17]. Вектор \vec{v} направлен по нормали к поверхности трения вглубь изнашиваемого материала. Любая, взятая на первоначальной поверхности трения, точка в процессе формоизменения детали будет совершать траекторию вдоль векторной линии

$$\bar{\rho}(t_k) = \bar{\rho}(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} \bar{v} \cdot dt, \quad (1)$$

где $\bar{\rho}$ - радиус-вектор точки в системе координат x, y, z ; t_0 - время начала движения, t_k - время окончания движения, соответствующее достижению деталью предельной формы.

Абсолютная величина \bar{v}_m зависит от свойств материалов сопряженной пары, внешней среды, температуры, напряженного состояния, скорости скольжения в точке m в момент времени, когда она окажется на поверхности трения. В свою очередь температурное и напряженно-деформационное поля будут изменяться в деталях узла трения в соответствии с изменяющейся формой деталей, режимами работы контакта, краевыми условиями на границах деталей (условиями теплоотвода, задежкой и т.д.).

Процесс формоизменения детали будет описываться движением совокупности точек, лежащих на первоначальной поверхности.

Решение эволюционных, с распределенными параметрами и обратными связями задач в замкнутой форме не представляется возможным. Наиболее общий прием решения таких задач заключается в дискретизации исследуемой системы во времени и пространстве и обращении к численным методам решения [18-24].

Для этого детали и их поверхности разбиваются на конечные элементы простой геометрической формы. Параметры, характеризующие состояние системы, определяются в конечном числе узловых точек, соединяющих эти элементы. В нашем случае рассматриваются траектории конечного числа точек на первоначальной поверхности детали, а температурное и напряженно-деформационное состояние определяется в конечном числе узловых точек как на поверхностях, так и в объеме деталей.

В каждый фиксированный момент времени состояние дискретизированной таким образом триботехнической системы может быть представлено n -мерным вектором $\bar{x}^T = \{\bar{\rho}_j, \bar{v}_k, T_k, U_k\}$, где $j = \overline{1, N}$, $K = \overline{1, M}$, N - число узловых точек на рабочей поверхности, M - общее число узловых точек системы, \bar{v} - температура, T - тензор напряжений, U - тензор деформаций; а изменение состояния системы во времени вектор-функцией

$$\bar{x}(t_k) = \bar{x}(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} \bar{f} \cdot dt, \quad (2)$$

где \bar{f} - n -мерный вектор - обобщенная скорость изменения состояния системы. Уравнение (1) является частным случаем (2).

Дискретизация поведения системы во времени сводится к рассмотрению ряда последовательных состояний системы через произвольно задаваемый достаточно малый конечный промежуток времени δt (шаг наработки). Соответственно уравнение (2) преобразуется в конечноразностное выражение

$$\bar{x}(t_{i+1}) = \bar{x}(t_i) + \bar{v}(t_i) \cdot \delta t; \quad \bar{x}(t_0). \quad (3)$$

Скорость изменения состояния системы на отрезке $[t_i, t_{i+1})$ зависит от свойств системы, режимных параметров и текущего состояния, принимаемых неизменными на этом отрезке и соответствующими одной из крайних точек этого отрезка, например t_i . Поэтому уравнение (3) может быть преобразовано

$$\bar{x}(t_{i+1}) = \bar{x}(t_i) + \bar{\lambda}(x(t_i)) \cdot \delta t; \quad \text{при } x(t_0) \quad (4)$$

и приведено к операторной форме

$$\bar{x}(t_{i+1}) = \Lambda \bar{x}(t_i), \quad (5)$$

где Λ - оператор перехода системы от i -го в $i+1$ -е состояние.

Применение принципа суперпозиции, т.е. независимости друг от друга элементарных процессов на отрезке δt , сводит решение к задаче линейного программирования.

При решении задачи изнашивания форма сопряженных деталей в $i+1$ -м состоянии определяется путем перемещения совокупности точек на рабочей поверхности i -го состояния на величину

$$\delta h_{i,j}^{(1)} = J_{i,j}^{(1)} \cdot l_{0,i,j}^{(1)} \cdot n_{i,j}^{(1)} \cdot \delta t, \quad (6)$$

$$\delta h_{i,j}^{(2)} = J_{i,j}^{(2)} \cdot l_{0,i,j}^{(2)} \cdot n_{i,j}^{(2)} \cdot \delta t, \quad j = \overline{1, N},$$

названную шагом износа, соответственно для сопряженных деталей (1) и (2) согласно рис. 2. Здесь J - интенсивность изнашивания материала (безразмерная величина); $J = \Delta h/l$, Δh - толщина изношенного слоя материала, l - путь трения, пройденный точкой контакта.

Величина J связана со скоростью изнашивания выражением $\dot{\eta} = \Delta h/\delta t = Jv$, где v - скорость движения точки контакта.

Согласно [25-27] интенсивность изнашивания может быть выражена

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{U_0 - \eta f p}{K \eta^p}\right), \quad (7)$$

где U_0 - энергия активации, η - постоянная, характеризующая структуру материала, f - коэффициент трения, p - удельная нагрузка, $R \eta^p$ - энергия теплового движения.

Для тихоходных тяжело нагруженных узлов трения, к которым относится большое количество деталей и узлов трения землеройных, строительных машин и оборудования горной промышленности, можно пренебречь влиянием температуры

и интенсивность изнашивания аппроксимировать в виде простого выражения $J = A\rho^B$ где A и B определяются экспериментально на унифицированных лабораторных машинах трения и являются паспортными параметрами, характеризующими износостойкие свойства конкретной пары материалов в конкретной внешней среде.

Удельная нагрузка на поверхности контакта определяется из решения контактной задачи при каждом i -м состоянии системы. Это решение для деталей простой геометрической формы может быть получено в замкнутом виде [27] или найдено методом конечных элементов [29].

Аналитическое исследование изменения состояния триботехнической системы представляет собой математический эксперимент, реализуемый с помощью ЭВМ. Если известны вероятностные закономерности исходных параметров, характеризующих режим работы, свойства и начальное состояние системы, то можно провести серию математических экспериментов, каждый из которых соответствует случайному набору исходных параметров (рис. 3). По результатам таких экспериментов также, как и для натурных, можно построить распределение искомых параметров: плотности вероятности распределения ресурса узла трения $p(t)/\bar{p} = \text{const}$ и плотности вероятности износа $p(\rho)/t = \text{const}$. Такой эксперимент позволяет произвести расчет вероятности безотказной работы узла (по критерию предельного износа) на отрезке времени $[t_0, t]$ [30]

$$P(t) = P\left\{\bar{p}(\tau) \in \Omega, \tau \in [t_0, t]\right\}, \quad (8)$$

где Ω - область работоспособных состояний системы.

Рассмотренные теоретические предпосылки легли в основу разработанных программ расчета на износ разнообразных узлов трения.

Примеры аналитических исследований изнашивания некоторых деталей и узлов трения иллюстрируются рис. 4-7.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.: Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977, стр. 526.
- [2] Проников А.С.: Методы расчета на износ. - В сб. "Расчетные методы оценки трения и износа". Брянск: Приокское кн. изд., 1975, стр. 48-97.
- [3] Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В.: Моделирование трения и изнашивания в машинах. - М.: Машиностроение, 1982, стр. 191.
- [4] Белый В.А., Старжинский В.Е., Щербаков С.В.: Металлополимерные зубчатые передачи. - Минск: Наука и техника, 1981, стр. 351.
- [5] Дроздов Ю.Н.: К разработке методики расчета на изнашивание и моделирование трения. - В кн.: Износостойкость, М.: Наука, 1975, стр. 120-135.
- [6] Коровчинский М.В.: Локальный контакт упругих тел при изнашивании их поверхностей. - В сб.: "Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа". М.: Наука, 1971, стр. 130.
- [7] Галин Л.А.: Контактные задачи теории упругости при наличии износа. - ПММ, 1976, т. 40, стр. 981.

- [8] Bayer R.G., Ku T.C.: Handbook of analytical design for wear - N.Y. Plenum press, 1964, p. 97.
- [9] Шеннон Р.: Имитационное моделирование - искусство и наука. - М.: Мир, 1978, стр. 420.
- [10] Вусленко В.Н.: Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. - М.: Наука, 1977.
- [11] Вусленко Н.П.: Моделирование сложных систем, - М.: Наука, 1968.
- [12] Вокс Дж., Дженкинс Г.: Анализ временных рядов, прогноз, управление. - М.: Мир, 1974.
- [13] Кафаров В.В. и другие: Системный анализ процессов химической технологии. М.: Наука, 1982, стр. 345.
- [14] Вентцель Е.С.: Исследование операций. М.: Советское радио, 1972, стр. 508.
- [15] Гриб В.В.: Методология исследования и расчета узлов трения как сложных систем. - Машиноведение, 1984, № 6, стр. 65-71.
- [16] Чихос Х.: Системный анализ в трибонике. - М.: Мир, 1982.
- [17] Гриб В.В.: Векторный анализ процесса изнашивания. - Трение и износ, 1983, т. 4, № 3, стр. 432-439.
- [18] Кемени Дж., Снелл Дж., Томпсон Дж.: Введение в конечную математику. - М.: Мир, 1965, стр. 486.
- [19] Самарский А.А.: Теория разностных схем. - М.: Наука, 1983, стр. 616.
- [20] Годунов С.К., Рябенский В.С.: Разностные схемы. - М.: Наука, 1977, стр. 439.
- [21] Марчук Г.И.: Методы вычислительной математики. - М.: Наука, 1977, стр. 455.
- [22] Зенкевич О.: Метод конечных элементов. - М.: Мир, 1975.
- [23] Boundary Element Method. Proceedings of the Third Intern. Seminar. - California, July, 1981.
- [24] Гриб В.В.: Решение триботехнических задач численными методами. - М.: Наука, 1982, стр. 112.
- [25] Крагельский И.В.: Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968, стр. 480.
- [26] Ратнер С.Б., Лурье Е.Г.: Термоактивационные представления о разрушении пластмасс при износе. - Механика полимеров, 1966, № 6, стр. 867-874.
- [27] Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.: Кинетическая природа прочности твердых тел. - М.: Наука, 1974, стр. 560.
- [28] Развитие теории контактных задач в СССР. - М.: Наука, 1976.
- [29] Chan S.K., Tuba J.S.: A finite element method for contact problems of solid bodies. - Intern. J. Mech. Sci., 1971, v. 13, n. 7, p. 615-637, Part 1, 2.
- [30] Бодотин В.В.: Прогнозирование ресурса машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1984, стр. 312.

Recenzent: Prof. dr hab. int. Władysław LENKIEWICZ

Wpłynęło do Redakcji: luty 1986 r.

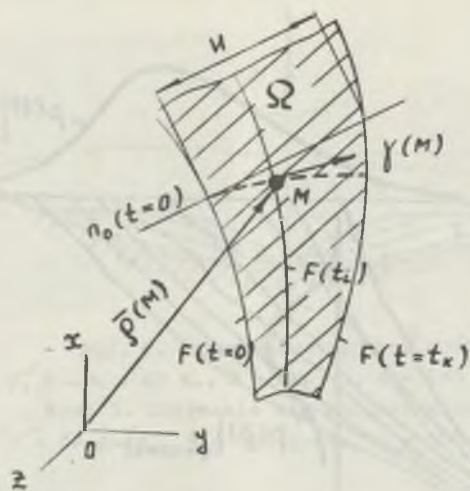


Рис. 1. Векторный анализ износа детали

n_0 - нормаль к исходной поверхности, F - поверхность трения, t - время

Rys. 1. Wektorowa analiza zużycia elementu

n_0 - normalna do powierzchni wyjściowej, F - powierzchnia tarcia, t - czas

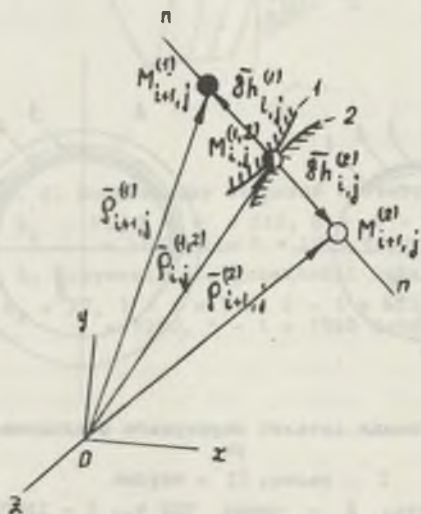


Рис. 2. Перемещение точки контакта в результате изнашивания на один шаг

Rys. 2. Przemieszczenie punktu styku w rezultacie zużycia się o jeden krok

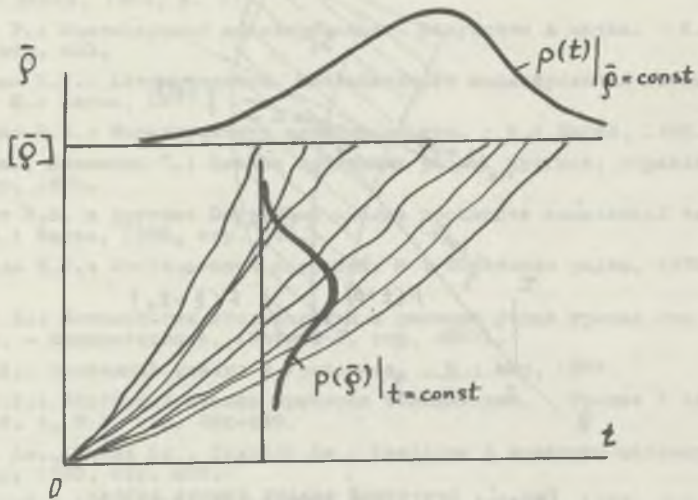


Рис. 3. Статистическое моделирование процесса изнашивания
 Rys. 3. Statystyczne modelowanie procesu zużycia się

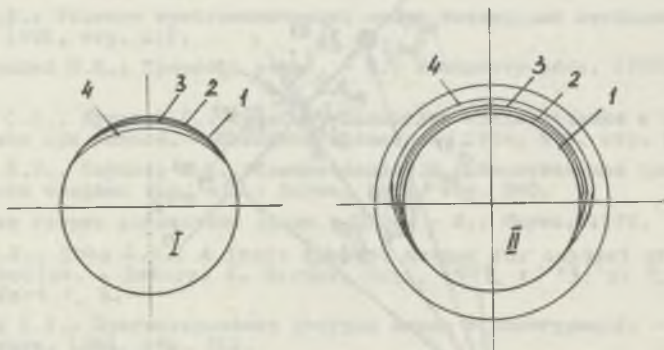


Рис. 4. Кинетика изнашивания деталей шарнирного соединения ковша экскаватора

I - палец, II - втулка

1 - исходная поверхность, 2 - через 750 ч., 3 - 1500 ч., 4 - 2000 ч.

Rys. 4. Kinetyka zużycia się elementów połączenia przegubowego czerpaka koparki

I - sworzeń, II - tuleja

1 - powierzchnia wyjściowa, 2 - po 750 godz., 3 - 1500 godz., 4 - 2000 godz.

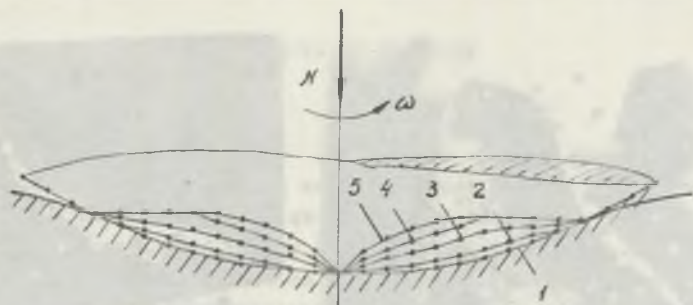


Рис. 5. Изнашивание шаровой опоры

1 - $t = 0$, 2 - $t = 42$ ч., 3 - 126 ч., 4 - 168 ч., 5 - 210 ч.

Rys. 5. Zużywanie się podpory kulistej

1 - $t = 0$, 2 - $t = 42$ godz., 3 - 126 godz., 4 - 168 godz., 5 - 210 godz.

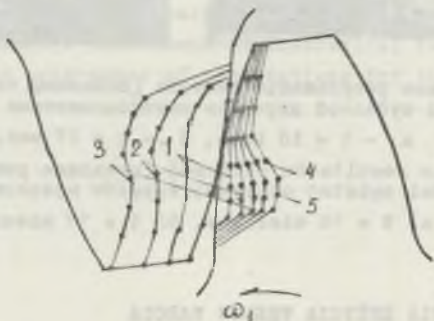


Рис. 6. Изнашивание открытой зубчатой передачи

$m = 4$, $Z_1 = 27$, $Z_2 = 2$, 1 - $t = 312$, 2 - $t = 625$, 3 - $t = 937$, 4 - $t = 1250$, 5 - $t = 1562$ суток

Rys. 6. Zużywanie się przekładni zębatej odkrytej

$m = 4$, $Z_1 = 27$, $Z_2 = 27$, 1 - $t = 312$, 2 - $t = 625$, 3 - $t = 937$, 4 - $t = 1250$, 5 - $t = 1562$ doby



Рис. 7. Сопоставление результатов расчета (показаны точками) и эксплуатации открытой зубчатой передачи высокомоментных приводов

а - $t = 10$ мес., б - $t = 17$ мес.

Rys. 7. Zestawienie rezultatów obliczeń (pokazane punktami) i eksploatacji przekładni zębatej odkrytej napędów wysokomomentowych

а) $t = 10$ miesięcy, б) $t = 17$ miesięcy

METODY PROGNOZOWANIA ZUŻYCIA WĘZŁÓW TARCIA ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW MASZYNOWYCH

S t r e s z c z e n i e

W pracy omówiono prognozowanie zużycia węzłów tarcia maszyn i urządzeń na etapie projektowania, wybór optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych i środków smarnych.

Przedstawiono złożony tribologiczny system węzłów tarcia maszyn. Wykazano, że poprawa trwałości węzłów tarcia wymaga rozpatrywania tego zagadnienia w systemowym ujęciu sprzężeń zwrotnych parametrów wejściowych i wyjściowych, mnogości wzajemnych połączeń i jednocześnie przebiegających procesów (kinematycznych, mechanicznych, cieplnych, hydrodynamicznych...).

W badaniu tych systemów wyróżnia się następujące etapy: analizę struktury systemu (zbiór elementów systemu i przebiegających w nim elementarnych procesów połączonych ze sobą), programowanie i realizację rozwiązań przy pomocy EMC (eksperyment matematyczny). Rozpatrzone teoretycznie przypadki stanowią podstawę opracowanych programów obliczeń na zużycie różnorodnych węzłów tarcia.

METHODS OF FORECASTING WEAR OF PLACES OF FRICTION
COMPLICATED MACHINES

S u m m a r y

The paper discusses forecasting wear of places of friction of machines and equipment at the stage of designing and the choice of optimum constructional solutions and of proper lubricant.

A complicated tribological system of places of friction of machines. It has been proved that the improvement of durability of places of friction requires consideration of this problem which would take into account feed-back of input and output parameters, great number of joints and processes occurring simultaneously (e.g. kinematic, mechanical, thermal, and hydrodynamic processes).

There are following stages in the examination of such systems: analysis of the structure of a system (of a set of system elements and elemental processes), programming and realization with the help of a computer (mathematical experiment). The discussed theoretical cases constitute the basis for elaborating programmes of computations for the wear of different places of friction.