

**Бекиров А.Ш.**

Харьковский национальный техниче-  
ский университет сельского хозяйства  
имени П.Василенко, г. Харьков, Укра-  
ина  
E-mail: L-bekirov@ukr.net

**СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ  
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ  
ПРОЦЕССОВ В ТРИБОСИСТЕМАХ**

УДК 621.891

*В работе выполнена структурная идентификация математической модели динамики переходных процессов скорости изнашивания и коэффициента трения в трибосистемах. Получены уравнения динамики переходных процессов в виде дифференциальных уравнений. Как следует из вида дифференциальных уравнений, переходный процесс в трибосистеме описывается колебательными звеньями второго порядка. Анализ уравнений позволил установить, что на динамику переходного процесса в трибосистеме влияет ускорение и скорость нарастания входного воздействия.*

*Установлено, что характер протекания переходного процесса после приложения к трибосистеме входного воздействия зависит от коэффициентов усиления и постоянных времени, а также значений декремента затухания.*

*Полученные решения дифференциальных уравнений для скорости изнашивания и коэффициента трения, которые позволяют выполнять моделирование переходного процесса в трибосистеме в процессе приработки. Получение таких решений является результатом структурной идентификации трибосистемы.*

**Ключевые слова:** трибосистема, моделирование, переходные процессы, приработка, скорость изнашивания, коэффициент трения, структурная идентификация

**Актуальность проблемы**

Практика проектирования машин и механизмов показывает, что в конструкторских бюро методы расчета на износостойкость и прогнозирования ресурса используются ограничено и имеют значительное отставание от методов расчета на прочность и надежность.

Отсутствие специальных методик расчета на износостойкость затрудняет выбор оптимальных вариантов конструкций трибосистем и тем более определения рациональные режимов приработки и эксплуатации. В результате трибосистемы проектируются с «запасом по износостойкости», либо имеет недостаточный ресурс, что приводит к простоям и ремонту в процессе эксплуатации. Тем более отсутствуют методики и математические модели моделирования переходных процессов в трибосистемах.

Согласно опубликованным работам износ за время приработки составляет 1/3-1/2 величины износа за период эксплуатации. Поэтому учет величины износа за время приработки является необходимым звеном в методиках и методах расчета на износостойкость на этапе проектирования новых машин.

Процесс приработки трибосистем является динамическим процессом т.к. связан с большим разнообразием сложных по своей природе явлений, протекающих на поверхностях трения трибоэлементов и влиянием на эти процессы большого количества факторов. Поэтому вид математической динамической модели необходимо искать в виде дифференциальных уравнений, которые с точностью до коэффициентов будут описывать переходный процесс. Получение таких уравнений и их решений носит название структурной и параметрической идентификации.

Исходя из вышеизложенного, в данной статье будут рассмотрены вопросы структурной идентификации динамической модели процессов приработки трибосистем.

### Анализ публикаций, посвященных данной проблеме

Модели переходных процессов в трибосистемах, обзор которых представлен в работе [1], строятся в основном на вероятностных подходах. Вероятностный подход также применяется при построении моделей, которые базируются на расчетах характеристик контакта и методах описания шероховатости поверхности [2-4].

Автор работы [5] приводит анализ методов расчета износа и прогнозирования ресурса на основании которого делается вывод о перспективности применения численных методов. В работе [6] предложено описывать износ массивом векторов вероятностей величин износа дискретных точек поверхности, называемых «трибоэлементами». Трибоэлемент моделируется нестационарными случайными функциями марковского типа, а износ оценивается математическим ожиданием вероятности нахождения трибоэлементов в некотором состоянии. Форма изношенной поверхности определяется с помощью кубической сплайн-аппроксимации математических ожиданий износа в точках расположения трибоэлементов.

Авторами работ [7-9] разработана методика математического моделирования переходных процессов в трибосистемах, в основу которой положен математический аппарат теории автоматического регулирования и теории идентификации динамических объектов. Авторами указанных выше работ построены структурно-динамические схемы для моделирования скорости изнашивания и силы трения на переходных режимах.

Дальнейшее развитие динамических моделей переходных процессов в трибосистемах получило в работах [10, 11] После проведения структурной и параметрической идентификации трибосистемы, авторами сделан вывод, что для выполнения моделирования переходных процессов необходим предварительный лабораторный тестовый эксперимент или испытания натуральных образцов. Наличие тестового эксперимента перед моделированием снижает ценность разработанной методики. Авторами работ [10, 11] делается вывод, что такие функциональные зависимости рациональнее получать в виде регрессионных уравнений, где в виде варьируемых факторов будут выступать объединенные комплексы параметров.

### Цель исследований

Выполнить структурную идентификацию математической модели переходных процессов в трибосистемах с точностью до коэффициентов.

### Методический подход в проведении исследований

Задача идентификации математической модели переходных процессов в трибосистеме, которая работает в условиях граничной смазки, сводится, в общем случае, к определению оператора модели. Под оператором трибосистемы будем понимать математическую модель изучаемого объекта. Обзор исследований, который выполнен в первом разделе данной работы и посвящен анализу математических моделей переходных процессов в трибосистемах во время приработки, позволяет утверждать, что структура модели и тип уравнений, которыми предполагается описывать трибосистему – это линейные дифференциальные уравнения второго порядка.

Получение дифференциальных уравнений переходных процессов в теории идентификации динамических объектов носит название идентификации.

Идентификация трибосистемы сводится к задаче получения математической модели адекватной изучаемому явлению. Под структурой модели будем понимать дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс с точностью до коэффициентов.

В общем виде математическая модель переходных процессов в трибосистеме будет состоять из двух блоков, рис. 1.

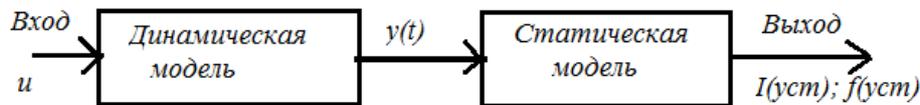


Рис. 1. Структура математической модели трибосистемы

Первый блок – это модель, которая описывает динамику процесса.

Второй блок – это статическая модель, которая описывает работу трибосистемы на установившемся режиме, т.е. после завершения переходного процесса (приработки).

Статическая модель трибосистемы, которая характеризует работу на установившемся режиме после завершения приработки, разработана авторами работы [12,13] и имеет следующий вид:

$$I_{уст} = 6 \cdot 10^{-10} \exp(0,795 \cdot 10^{16} \cdot \frac{1}{E_y} \sqrt{\frac{\pi}{\delta_n \cdot \delta_H}} \cdot W_{mp}), \frac{м^3}{час}, \quad (1)$$

$$f_{уст} = \frac{W_{mp}}{W}, \quad (2)$$

где  $I_{уст}$  и  $f_{уст}$  – объемная скорость изнашивания, м<sup>3</sup>/час и коэффициент трения трибосистемы после завершения приработки;

$E_y$  – трибологические свойства смазочной среды, Дж/м<sup>3</sup>;

$\delta_n$  и  $\delta_H$  – коэффициенты, которые учитывают реологические свойства структуры материала у подвижного и неподвижного трибоэлементов;

$W_{mp}$  – скорость работы диссипации в трибосистеме, которая равна алгебраической сумме скоростей работы диссипации у подвижного и неподвижного трибоэлементов, Дж/с;

$W$  – мощность, которая подводится к трибосистеме, определяется по выражению:

$$W = N \cdot \mathcal{G}_{скл} = H \cdot \frac{M}{c} = Bm, \quad (3)$$

где  $N$  – нагрузка на трибосистему, Н;

$\mathcal{G}_{скл}$  – скорость скольжения, м/с.

Согласно приведенных выше выражений вход  $u$  в трибосистему на рис.1, определяет  $W$ , формула (3), а выход из блока динамической модели  $y(t)$  – это  $I(t)$  и  $f(t)$ .

Динамическая модель трибосистемы в теории идентификации динамических объектов может быть задана в виде обыкновенного дифференциального уравнения  $n$ -го порядка в следующей форме:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_0 u(t), \quad (4)$$

где  $a_i, b_j, i = 0; 1 \dots n; j = 0; 1 \dots m$  – параметры модели, подлежащие идентификации.

Для описання конкретного переходного процесу в трибосистемі к дифференціальному рівнянню (4) необхідно додати початкові умови і застосовуючи перетворення Лапласа, можна отримати передаточну функцію в наступному вигляді:

$$G(p) = \frac{y(p)}{u(p)} = \frac{\sum_{i=0}^m b_i p^i}{\sum_{i=0}^n a_i p^i}, \quad (5)$$

де  $p$  – комплексна змінна – параметр перетворення Лапласа.

Основою на апріорній інформації, а також експериментальних дослідженнях, які виконані автором даної роботи, характер протікання приработки в трибосистемі можна представити в вигляді наступних переходних характеристик. Для трибосистем, які функціонують в умовах граничної смазки, крива швидкості зношування в час приработки має вигляд, як представлено на рис. 2. В початковий момент часу, при  $t=0$ ,  $I(t)=0$ . При  $t > 0$  відбувається швидкий ріст швидкості зношування, для деяких конструкцій трибосистем впродовж декількох хвилин, а потім плавне зниження по експоненціальному закону до величини  $I_{уст}$ , яку можна розрахувати за формулою (1).

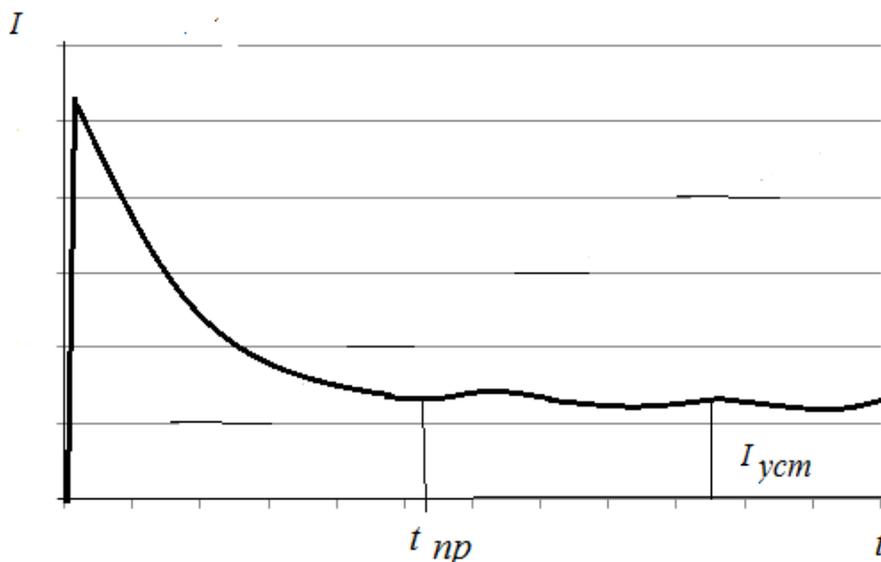


Рис.2. Характер зміни швидкості зношування трибосистемі в процесі приработки:  
 $t_{np}$  – час приработки;  $I_{уст}$  – швидкість зношування після завершення приработки

Характер зміни коефіцієнта тертя трибосистемі представлено на рис.3, де крива 1 характеризує трибосистему з хорошою прирабатувальністю, а крива 2 – трибосистему з поганою прирабатувальністю, при цьому  $t_{np1} < t_{np2}$ ;  $f_{уст1} < f_{уст2}$ .

Розглядаючи фізику переходних процесів моделювання швидкості зношування в процесі приработки, рис. 2 і коефіцієнта тертя, рис. 3, слід зауважити, що залежності переходного процесу в трибосистемі відповідають інерційному коливальному ланці другого порядку.

### Результати досліджень

Структурно-динамічну схему моделювання переходного процесу швидкості зношування представимо в наступному вигляді, рис.4.

Передаточна функція  $K_3$  враховує значення швидкості зношування трибосистемі на установившійся режимі, після завершення приработки.

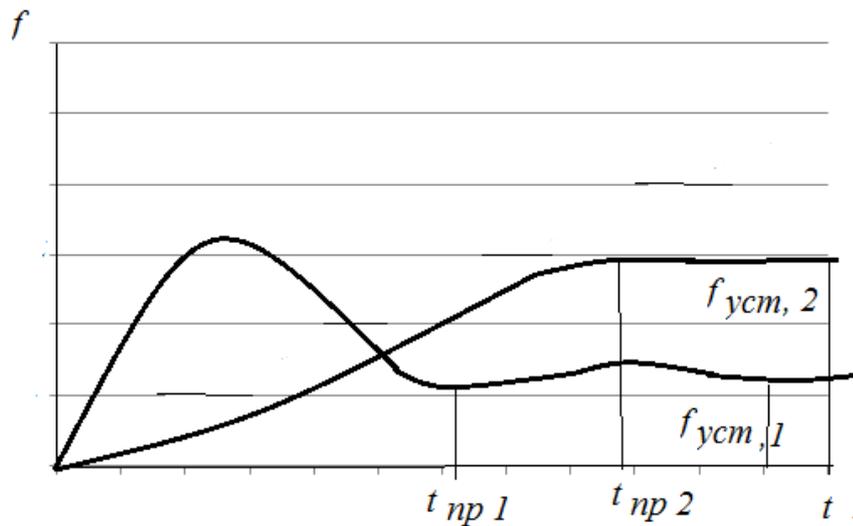


Рис. 3. Характер изменения коэффициента трения трибосистемы в процессе приработки:  
 $t_{np}$  – время приработки;  $f_{уст}$  – коэффициент трения после завершения приработки;  
 1 – трибосистема с хорошей прирабатываемостью; 2 – трибосистема с плохой прирабатываемостью

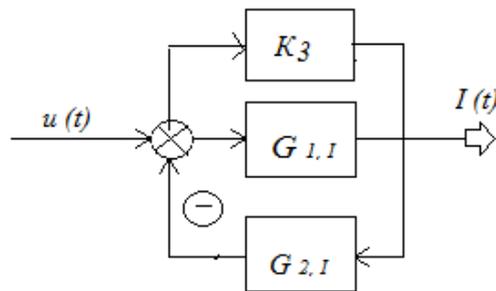


Рис. 4. Структурно-динамическая схема моделирования переходного процесса скорости изнашивания

Передаточная функция  $G_{1,l}$  учитывает реакцию трибосистемы на входное воздействие, когда скорость изнашивания в начальный период времени максимальна, а затем уменьшается до установившегося значения, как отражено на рис. 2. Это связано с пластической деформацией шероховатостей поверхностей трения, которая в процессе приработки переходит в упругую, упрочнением подповерхностных слоев, выравниванием градиента температур в трибоэлементах по всему объему. Передаточная функция соответствует реальному дифференцирующему звену (с задержкой)  $G_{1,l}$ , которую можно записать в виде:

$$G_{1,l} = \frac{K_1 P}{T_1 P + 1}, \quad (6)$$

где  $K_1$  – коэффициент усиления, который учитывает степень влияния входного сигнала на величину выходного сигнала;

$T_1$  – постоянная времени трибосистемы, которая учитывает инерционные свойства выравнивания градиента температур по толщине трибоэлемента.

$P$  – оператор дифференцирования,  $P = \frac{d}{dt}$ , применяется вместо знака дифференцирования;

Передаточная функция  $G_{2,l}$ , которая включена в схему в виде отрицательной обратной связи, учитывает способность трибосистемы прирабатываться и зависит от перестройки поверхностных и подповерхностных слоев материалов из которых изготовлены

трибоелементы. Такою функцію можна описати інерційним звеном:

$$G_{2,I} = \frac{K_2}{T_2 P + 1}, \quad (7)$$

где  $K_2$  – коэффициент усиления, который учитывает степень влияния входного сигнала на перестройку структуры материала в поверхностных и подповерхностных слоях трибоэлементов;

$T_2$  – постоянная времени, которая учитывает скорость перестройки структуры материала в поверхностных и подповерхностных слоях трибоэлементов.

Структурно-динамическая схема отражает не функциональное назначение и конструктивные взаимосвязи в трибосистеме, а математические операции, которые осуществляются при передаче входного сигналов ( $u$ ) через звенья и динамические свойства трибосистемы в целом.

Применяя методы теории идентификации динамических объектов можно получить эквивалентную передаточную функции для изменения скорости изнашивания в трибосистеме во время переходного процесса (приработки):

$$G_I = \frac{G_{1,I}}{1 + G_{1,I} \cdot G_{2,I}} + K_3 = \frac{\frac{K_1 P}{T_1 P + 1}}{1 + \frac{K_1 \cdot K_2 P}{(T_1 P + 1)(T_2 P + 1)}} + K_3. \quad (8)$$

После преобразования формулы (8) получим:

$$G_I = \frac{K_1 T_2 P^2 + K_1 P}{T_1 T_2 P^2 + (T_1 + T_2 + K_1 K_2) P + 1} + K_3. \quad (9)$$

Произведем замену в выражении (9).

Постоянную времени трибосистемы для моделирования скорости изнашивания выразим следующей формулой:

$$T_I = \sqrt{T_1 \cdot T_2}, \quad (10)$$

Декремент затухания колебаний после завершения приработки выразим следующей формулой:

$$d_I = \frac{(T_1 + T_2 + K_1 K_2)}{2 \cdot T_I}, \quad (11)$$

Соответствующее уравнение динамики переходного процесса для моделирования скорости изнашивания запишем на основании передаточной функции (9):

$$(T_I^2 P^2 + 2d_I T_I P + 1) + K_3 = (K_1 T_2 P^2 + K_1 P). \quad (12)$$

Уравнения динамики переходного процесса для моделирования скорости изнашивания трибосистемы можно записать в виде дифференциального уравнения в натуральных переменных:

$$T_I^2 \frac{d^2 I}{dt^2} + 2d_I T_I \frac{dI}{dt} + I + K_3 = K_1 T_2 \frac{d^2 W}{dt^2} + K_1 \frac{dW}{dt}. \quad (13)$$

Правая часть дифференциального уравнения (13) содержит первую и вторую производную входного сигнала  $W$ , который рассчитывается по формуле (3).

Коэффициент  $K_I$  при входном сигнале в теории идентификации называют коэффициентом усиления.  $K_I$  показывает, как сильно входной сигнал  $W$ , влияет на выходной - величину скорости изнашивания.

Левая часть уравнения – это реакция трибосистемы на входной сигнал  $W$ .

Постоянная времени трибосистемы  $T_I$  имеет размерность времени и характеризует инерционность протекающих процессов в трибосистеме, т.е. время приработки.

Увеличение постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$ , делает процесс менее восприимчивым к изменению входного сигнала, процесс приработки увеличивается во времени, а значение скорости изнашивания на установившемся режиме после завершения приработки увеличивается.

Декремент затухания  $d_I$  трибосистемы или коэффициент демпфирования, характеризует наличие или отсутствие колебательного процесса. При значениях  $d_I < 0,7$ , переходный процесс имеет колебания. При значениях  $d_I > 0,7$ , переходный процесс не имеет колебаний. Чем больше  $d_I$ , тем полнее становится переходный процесс.

Решением для приведенного выше дифференциального уравнения (13) является следующее выражение:

$$I(t) = I_{ycm} \left[ K_I e^{\frac{-d_I t}{T_I}} \cdot (\cos \nu_I t + A_I \sin \nu_I t) \right] + I_{ycm}, \quad (14)$$

где  $I_{ycm}$ - установившееся значение скорости изнашивания трибосистемы после завершения приработки, определяется по выражению (1);

$\nu_I$  – частота колебаний скорости изнашивания после завершения приработки;

$$\nu_I = \frac{\sqrt{1 - d_I^2}}{T_I}. \quad (15)$$

Величина отклонения скорости изнашивания от текущего значения во время колебательного процесса:

$$A_I = \frac{d_I}{\sqrt{1 - d_I^2}}. \quad (16)$$

Структурно-динамическую схему моделирования переходного процесса коэффициента трения представим в следующем виде, рис.5.

Передаточная функция  $G_{1,f}$  учитывает инерционные свойства трибосистемы, которые связаны с выравниванием градиента температур в трибоэлементах по всему объему, формирование оптимальной шероховатости поверхностей трения и упрочнение подповерхностного слоя на некоторую глубину. Передаточную функцию инерционного звена  $G_{1,f}$  можно записать в виде [7]:

$$G_{1,f} = \frac{K_1}{T_1 P + 1}, \quad (17)$$

где величины  $K_I$ ,  $T_I$ ,  $P$  – величины, аналогичные приведенным выше.

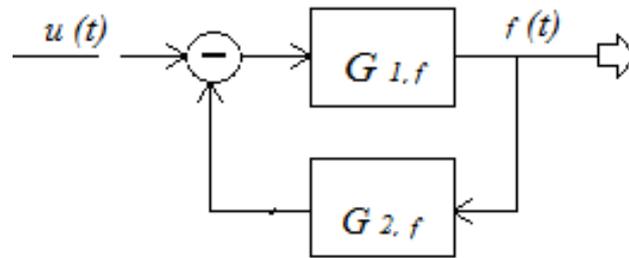


Рис. 5. Структурно-динамическая схема моделирования переходного процесса коэффициента трения

Передаточная функция  $G_{2,f}$ , которая включена в схему в виде отрицательной обратной связи, учитывает способность трибосистемы прирабатываться и зависит от перестройки поверхностных и подповерхностных слоев материалов из которых изготовлены трибоэлементы. Такую функцию можно описать инерционным звеном:

$$G_{2,f} = \frac{K_2}{T_2 P + 1}, \quad (18)$$

где  $K_2$ ,  $T_2$ ,  $P$  – величины, аналогичные приведенным выше.

Применяя методы теории идентификации динамических объектов можно получить эквивалентную передаточную функции для изменения коэффициента трения в трибосистеме во время переходного процесса (приработки):

$$G_f = \frac{G_{1,f}}{1 + G_{1,f} \cdot G_{2,f}} = \frac{\frac{K_1}{T_1 P + 1}}{1 + \frac{K_1 \cdot K_2}{(T_1 P + 1)(T_2 P + 1)}}. \quad (19)$$

После преобразования формулы (19) получим:

$$G_f = \frac{\frac{T_2}{K_2} P + \frac{1}{K_2}}{\frac{T_1 T_2}{K_1 K_2} P^2 + \frac{(T_1 + T_2)}{K_1 K_2} P + \frac{(K_1 K_2 + 1)}{K_1 K_2}}. \quad (20)$$

Произведем замену в выражении (20).

Постоянную времени трибосистемы для моделирования коэффициента трения выразим следующей формулой:

$$T_f = \sqrt{\frac{T_1 \cdot T_2}{K_1 \cdot K_2}}. \quad (21)$$

Декремент затухания колебаний после завершения приработки выразим следующей формулой:

$$d_f = \frac{(T_1 + T_2)}{2 \cdot T_f \cdot K_1 \cdot K_2}, \quad (22)$$

Соответствующее уравнение динамики переходного процесса для моделирования коэффициента трения запишем на основании передаточной функции (20):

$$\left( T_f^2 P^2 + 2d_f T_f P + 1 + \frac{1}{K_1 K_2} \right) = \left( \frac{T_2}{K_2} P + \frac{1}{K_2} \right). \quad (23)$$

Уравнения динамики переходного процесса для моделирования коэффициента трения трибосистемы можно записать в виде дифференциального уравнения в натуральных переменных:

$$T_f^2 \frac{d^2 f}{dt^2} + 2d_f T_f \frac{df}{dt} + f + \frac{f}{K_1 K_2} = \frac{T_2}{K_2} \frac{dW}{dt} + \frac{W}{K_2}. \quad (24)$$

Решением для приведенного выше дифференциального уравнения (24) является следующее выражение:

$$f(t) = f_{уст} \left[ 1 - e^{\frac{-d_f t}{T_f}} \cdot (\cos \nu_f t + A_f \sin \nu_f t) \right], \quad (25)$$

где  $f_{уст}$  - установившееся значение коэффициента трения трибосистемы после завершения приработки, определяется по выражению (2);

$\nu_f$  – частота колебаний коэффициента трения после завершения приработки;

$$\nu_f = \frac{\sqrt{1 - d_f^2}}{T_f}. \quad (26)$$

Величина отклонения коэффициента трения от текущего значения во время колебательного процесса:

$$A_f = \frac{d_f}{\sqrt{1 - d_f^2}}, \quad (27)$$

Полученные решения дифференциальных уравнений (14) и (25) позволяют выполнять моделирование переходного процесса в трибосистеме в процессе приработки. Получение таких решений является результатом структурной идентификации трибосистемы. Как следует из вида дифференциальных уравнений, переходный процесс в трибосистеме описывается колебательными звеньями второго порядка. Анализ уравнений позволил установить, что на динамику переходного процесса в трибосистеме влияет ускорение и скорость нарастания входного воздействия  $W$ .

Характер протекания переходного процесса после приложения к трибосистеме входного воздействия ( $W$ ) зависит от коэффициентов усиления  $K_1$  и  $K_2$ , постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$ , а также значений декремента затухания  $d_1$  и  $d_f$ . Можно предположить, что числовые значения  $K_i$ ,  $T_i$ ,  $d_i$  зависят от конструкции трибосистемы, материалов трибоэлементов, смазочной среды, нагрузки и скорости скольжения.

### Выводы

1. Выполнена структурная идентификация математической модели динамики переходных процессов скорости изнашивания и коэффициента трения в трибосистемах. Получены уравнения динамики переходных процессов в виде дифференциальных уравнений. Как следует из вида дифференциальных уравнений, переходный процесс в трибосистеме описывается колебательными звеньями второго порядка. Анализ уравнений позволил установить, что на динамику переходного процесса в трибосистеме влияет ускорение и скорость нарастания входного воздействия  $W$ .

2. Установлено, что характер протекания переходного процесса после приложения к трибосистеме входного воздействия ( $W$ ) зависит от коэффициентов усиления  $K_I$  и  $K_2$ , постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$ , а также значений декремента затухания  $d_I$  и  $d_f$ .

3. Полученные решения дифференциальных уравнений для скорости изнашивания и коэффициента трения, которые позволяют выполнять моделирование переходного процесса в трибосистеме в процессе приработки. Получение таких решений является результатом структурной идентификации трибосистемы.

### Литература

1. Богданофф Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
2. Семенюк Н.Ф. Средняя высота микровыступов шероховатой поверхности и плотность пятен контакта при контактировании шероховатой поверхности с гладкой // Трение и износ. – 1986. – Т.7, №1. – С. 85-91.
3. Terletzka, Semenjuk, Deierich. Modellierung des Kontaktes zweier rauher Körper/ Wissenschaftliche Berichte Hochschule Zittau/Görlitz Nr/ 1551 (1996), Heft 45. – S. 151 – 165.
4. Semenjuk N. Entwicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs- und Verschleißtheorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder: Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau. Zittau, 1991.
5. Сорокатый Р.В. Анализ современного состояния методов расчета износа и прогнозирования ресурса // Проблемы трибології. – 2007. – №1. – С. 23-36.
6. Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов. – Хмельницкий: ХНУ, 2009. – 242 с.
7. Войтов В.А., Исаков Д.И. Моделирование граничного трения в трибосистемах. I. Методика физического моделирования // Трение и износ. – 1996. – Т.17, №3. – С. 298-306.
8. Войтов В.А., Исаков Д.И. Моделирование граничного трения в трибосистемах. II. Методика математического моделирования стационарных процессов при граничном трении // Трение и износ. – 1996. – Т.17, №4. – С. 456-462.
9. Войтов В.А., Исаков Д.И. Моделирование граничного трения в трибосистемах. III. Математическое моделирование нестационарных процессов при граничном трении // Трение и износ. – 1996. – Т.17, №5. – С. 598-605.
10. Войтов В.А., Козырь А. Г. Моделирование переходных процессов в трибосистемах. Часть 1. Критерии оценки переходных процессов // Проблемы трибології. – 2013. – № 3. – С. 114 – 122.
11. Войтов В.А., Козырь А. Г., Сысенко И.И. Моделирование переходных процессов в трибосистемах. Часть 2. Методика моделирования переходных процессов // Проблемы трибології. – 2013. – № 4. – С. 25 – 32.
12. Войтов В.А., Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистемах // Проблемы трибології. – 2015. – № 1. – С. 49-57.
13. Войтов В.А., Захарченко М.Б. Моделирование процессов трения изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 2. Результаты моделирования // Проблемы трибології. – 2015. – № 2. – С. 36-45.

## Summary

**Bekirov A.S.** Structural identification of the mathematical model of transient processes in tribosystems.

*The work performed structural identification of mathematical models of the dynamics of transients wear rate and friction coefficient tribosystems. Performed equations of the dynamics of transients in the form of differential equations. As follows from the form of differential equations, the transition process in tribosystem described oscillatory functioning of the second order. Analysis equations revealed that the dynamics of the transition process in tribosystem affects acceleration and the rate of rise of the input exposure.*

*It was found, that the nature of the transient process after application to the tribosystem input action depends on the gain and time constant and decrement values.*

*The resulting solution of differential equations for the wear rate and coefficient of friction, which allow you to perform simulations of the transition process in tribosystem during running. The preparation of such solutions is the result of structural identification tribosystem.*

**Keywords:** tribosystem, modeling, wear rate, transition process, running, wear rate, friction coefficient, structural identification

## References

1. Kuz'menko A.G. Vlijanie statisticheskoy neodnorodnosti, razmerov i kinematicheskikh uslovij na iznos poverhnostej trenija // Trenie i iznos. – 1985. – T.6, № 3. – S. 432-441.
2. Tartakovskij I.B. Korreljacionnoe uravnenie iznosa // Vestnik mashinostroenija. – 1968. – № 2.
3. Benderskij A.M. Veroyatnostnaja model' iznosa detali // Nadezhnost' i kontrol' kachestva. – 1970. – № 5. – S. 13-24.
4. Kosteckij B.I., Strel'nikov V.P., Tacij V.G. Markovskaja model' iznosa i prognozirovanie dolgovechnosti iznashivaemyh detalej // Problemy trenija i iznashivaniya. – 1976. – № 10. – S. 10-15.
5. Bogdanoff Dzh., Kozin F. Veroyatnostnye modeli nakoplenija povrezhdenij: Per. s angl. – M.: Mir, 1989. – 344 s.
6. Semenjuk N.F. Srednjaja vysota mikrovystupov sherohovatoj poverhnosti i plotnost' pjaten kontakta pri kontaktirovanii sherohovatoj poverhnosti s gladkoj // Trenie i iznos. – 1986. – T.7, №1. – S. 85-91.
7. Sorokatyj R.V. Analiz sovremennogo sostojanija metodov rascheta iznosa i prognozirovaniya resursa // Problemi tribologii. – 2007. – №1. – S. 23-36.
8. Sorokatyj R.V. Metod tribojelementov. – Hmel'nickij: HNU, 2009. – 242 s.
9. Vojtov V.A., Isakov D.I. Modelirovanie granichnogo trenija v tribosistemah. I. Metodika fizicheskogo modelirovanija // Trenie i iznos. – 1996. – T.17, №3. – S. 298-306.
10. Vojtov V.A., Isakov D.I. Modelirovanie granichnogo trenija v tribosistemah. II. Metodika matematicheskogo modelirovanija stacionarnyh processov pri granichnom trenii // Trenie i iznos. – 1996. – T.17, №4. – S. 456-462.
11. Vojtov V.A., Isakov D.I. Modelirovanie granichnogo trenija v tribosistemah. III. Matematicheskoe modelirovanie nestacionarnyh processov pri granichnom trenii // Trenie i iznos. – 1996. – T.17, №5. – S. 598-605.
12. Vojtov V.A. Principy konstruktivnoj iznosostojkosti uzlov trenija gidromashin / V.A. Vojtov, O.M. Jahno, F.H. Abi-Saab. – K.: KPI, 1999. – 192 s.