

Бекиров А.Ш.

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

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

УДК 621.891

В работе выполнена параметрическая идентификация динамических моделей процесса приработки трибосистем. Получены выражения для определения коэффициентов усиления и постоянных времени. Показано, что после их подстановки в решения дифференциальных уравнений можно моделировать процессы изменения скорости изнашивания и коэффициента трения во время приработки.

Определен физический смысл коэффициентов усиления и постоянных времени. Коэффициент K_1 определяет чувствительность трибосистемы к входному воздействию, а следовательно, величину «заброса» скорости изнашивания и коэффициента трения в процессе приработки. Коэффициент K_2 определяет способность трибосистемы прирабатываться. Постоянная времени T_1 – это время, которое необходимо для стабилизации градиента температур по всему объему трибоэлементов с учетом их температуропроводности. T_2 – это время, за которое происходит перестройка структуры поверхностных и подповерхностных слоев трибоэлементов, процессы деформации и упрочнения.

Ключевые слова: трибосистема, моделирование, переходные процессы, приработка, скорость изнашивания, коэффициент трения, параметрическая идентификация, коэффициенты усиления, постоянные времени.

Актуальность проблемы

Данная статья является продолжением работы [1], где получены динамические модели изменения скорости изнашивания и коэффициента трения в процессе приработки трибосистем. Однако использовать данные модели для моделирования процесса приработки затруднительно, т.к. неизвестны значения коэффициентов K_1 и K_2 , а также значения постоянных времени T_1 и T_2 .

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 для моделирования динамических процессов необходимо получить выражения для определения коэффициентов и постоянных времени, которые будут описывать переходный процесс. Получение выражений для K_1 и K_2 , а также для постоянных времени T_1 и T_2 носит название параметрической идентификации.

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

Анализ публикаций, посвященных данной проблеме

Из анализа работ, посвященных вопросам идентификации динамических моделей, следует, что базовым подходом при определении параметров динамической модели является метод наименьших квадратов (МНК). Наряду с МНК существуют другие методы параметрической идентификации, например, методы вероятностного подхода, оценка максимального правдоподобия, алгоритмы стохастической аппроксимации, байесовский оценки и др. [2-8].

Л.И.Седов в своей книге [9] показывает, что в том случае, когда применение теоретических методов при изучении явления встречает трудности, наилучшие результаты

приносит комбинирование теории подобия с экспериментально-теоретическими методами.

При решении задач трения и изнашивания часто применяют методический подход теории подобия и моделирования [9,10], где для получения безразмерных критериев подобия применяют методы анализа размерностей. Анализируя размерные факторы, которые влияют на процесс, но при этом не зависят друг от друга, можно получить безразмерные критерии (коэффициенты), которые адекватно описывают процесс у подобных (разных по размерам и конструкции) физических объектов. Используя основные положения работы [9], а также работы [10], авторами работ [11-14] применен критериальный подход в получении безразмерных критериев, характеризующих процесс трения и изнашивания. Такой методический подход позволяет получить искомые выражения для коэффициентов усиления и постоянных времени, которые входят в дифференциальные уравнения [1].

Цель исследований

Целью параметрической идентификации является определить выражение для расчета приведенных выше коэффициентов и постоянных времени, чтобы при подстановке их в уравнения, которые приведены в [1], правая и левая часть отличались наименьшим образом.

Методический подход в проведении исследований

Задача параметрической идентификации математической модели переходных процессов в трибосистеме, которая работает в условиях граничной смазки, сводится, в общем случае, к определению коэффициентов усиления K_1 , K_2 , и постоянных времени T_1 , T_2 . Процедура параметрической идентификации или нахождения данных выражений, является экспериментальный материал, который позволяет выбрать наиболее значимые факторы, которые влияют на процесс приработки.

К таким факторам относятся:

1. Напряжение на фактических пятнах контакта $\sigma_{фнк}$, Па. Зависит от нагрузки на трибосистему N , Н, модуля упругости и величины шероховатости контактирующих материалов трибоэлементов. Рассчитывается по формулам, приведенным в работе [12].
2. Скорость деформации в подвижном $\dot{\epsilon}_n$ и неподвижном $\dot{\epsilon}_н$, трибоэлементах, 1/с. Зависит от нагрузки N , Н, скорости скольжения $v_{скль}$, м/с, модуля упругости и коэффициента Пуассона контактирующих материалов трибоэлементов. Рассчитывается по формулам, приведенным в работе [12].
3. Коэффициент формы трибосистемы K_{ϕ} , 1/м, учитывает площади трения и объемы, расположенные под площадями трения у подвижного и неподвижного трибоэлементов. Рассчитывается по формуле, приведенной в работе [13].
4. Коэффициент температуропроводности a , м²/с, учитывает температуропроводность материалов подвижного a_n и неподвижного $a_н$ трибоэлементов. Справочная величина.
5. Трибологические свойства смазочной среды E_v , Дж/м³, определяются на четырехшариковой машине трения и учитывают противоизносные и противозадирные свойства смазочных материалов. Справочная величина, значения для различных смазочных материалов представлены в работе [14].
6. Реологические свойства структуры материалов подвижного δ_n и неподвижного $\delta_н$ трибоэлементов. Безразмерная величина, учитывает внутреннее трение структуры материала. Значения внутреннего трения для сталей, чугунов, бронз представлено в работе [15].
7. Меньшая площадь трения одного из трибоэлементов, F_{min} , м².

8. Объемы материала, расположенные под площадями трения у подвижного V_n , m^3 и неподвижного V_n , m^3 трибоэлементов.
9. Глубина деформации подповерхностных слоев материала подвижного $h_{\partial n}$, м и неподвижного $h_{\partial n}$, м трибоэлементов. Рассчитывается по формулам, приведенным в работе [12].
10. Объем материала подвижного $V_{\partial n}$ и неподвижного $V_{\partial n}$ трибоэлементов, m^3 , который участвует в деформации в процессе трения. Рассчитывается по формулам:

$$V_{\partial n} = F_{\max} \cdot h_{\partial n}, m^3, \quad (1)$$

$$V_{\partial n} = F_{\min} \cdot h_{\partial n}, m^3, \quad (2)$$

где F_{\max} – большая площадь трения одного из трибоэлементов.

Результаты исследований

В работе [16] предложена физическая величина – качество трибосистемы Q , которая оценивается по формуле:

$$Q = E_y \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}}, Дж / m^3. \quad (3)$$

Качество трибосистемы учитывает трибологические свойства смазочной среды E_y и внутреннее трение структуры материалов подвижного δ_n и неподвижного δ_n трибоэлементов. Данная физическая величина не учитывает геометрические размеры трибосистемы, которые можно выразить в виде коэффициента формы K_ϕ , рассчитывается по формуле [13]:

$$K_\phi = \frac{F_{\min}}{V_n + \frac{V_n \cdot F_{\max}}{F_{\min}}}, \frac{1}{m}. \quad (4)$$

Значимыми параметрами также являются: температуропроводность материалов трибоэлементов a , m^2/c и скорость деформации в данных материалах $\dot{\epsilon}$, $1/c$.

Учитывая то, что в трибосистеме одновременно участвуют в работе подвижный и неподвижный трибоэлемент, используем понятия приведенных значений.

Приведенный коэффициент температуропроводности трибосистемы определим по выражению:

$$a_{np} = \frac{2 \cdot a_n \cdot a_n}{a_n + a_n}, m^2 / c. \quad (5)$$

Приведенную скорость деформации в подповерхностных слоях материалов трибосистемы определим по выражению:

$$\dot{\epsilon}_{np} = \frac{2 \cdot \dot{\epsilon}_n \cdot \dot{\epsilon}_n}{\dot{\epsilon}_n + \dot{\epsilon}_n}, 1 / c, \quad (6)$$

где на основании работы [12]:

$$\dot{\epsilon}_n = 75(1 + \mu_n)(0,86 - 1,05\mu_n) \frac{\sigma_{\phi nk} \cdot v_{скл}}{E_n \cdot d_{\phi nk}}, \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon}_n = 75(1 + \mu_n)(0,86 - 1,05\mu_n) \frac{\sigma_{\phi nk} \cdot v_{скл}}{E_n \cdot d_{\phi nk}}, \quad (8)$$

где μ_n и μ_n – коэффициенты Пуассона материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов, справочная величина;

E_n и E_n модуль упругости материалов подвижного и неподвижного трибоэлементов, справочная величина;

$d_{фнк}$ – диаметр фактического пятна контакта, м², рассчитывается по формуле представленной в работе [12].

С учетом изложенных дополнений качество трибосистемы можно оценить по выражению:

$$Q = \frac{K_\phi^2 \cdot a_{np} \cdot E_y}{\dot{\epsilon}_{np}} \cdot \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}}, \text{ Дж / м}^3. \quad (9)$$

Приведенное выражение качества трибосистемы, в отличие от известного [16] учитывает:

- геометрические размеры трибосистемы, которые влияют на время приработки;
- температуропроводность материалов трибоэлементов, которая влияет на уровень температурных напряжений в поверхностных слоях;
- скорость распространения деформации в поверхностных слоях материала трибоэлементов, которая влияет на степень релаксации напряжений.

Перечисленные отличия оказывают влияние на время приработки трибосистем, а следовательно на динамику переходных процессов в трибосистемах.

Коэффициент усиления K_1 , который входит в дифференциальные уравнения и их решения, в теории идентификации динамических объектов называют коэффициентом, который оценивает степень влияния входного сигнала на выходной. Основываясь на таком физическом понятии и используя методы размерностей теории подобия и моделирования, получим выражение:

$$K_1 = \frac{\sigma_{фнк}}{Q} = \frac{\sigma_{фнк} \cdot \dot{\epsilon}_{np}}{K_\phi^2 \cdot a_{np} \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}}}. \quad (10)$$

Как следует из выражения (10) отношение напряжения на пятнах фактического контакта $\sigma_{фнк}$ к качеству трибосистемы Q оценивает чувствительность трибосистемы к внешним воздействиям. Чем больше чувствительность трибосистемы, тем больше будет «заброс» величины скорости изнашивания и коэффициента трения в процессе приработки от установившихся значений, которые характерны для трибосистемы после завершения приработки.

Для уменьшения чувствительности трибосистем к внешним воздействиям необходимо увеличивать качество трибосистемы. Анализ выражения (9), которое определяет качество трибосистемы, позволяет сформулировать пути снижения чувствительности трибосистемы во время приработки.

1. Увеличение коэффициента формы трибосистемы K_ϕ , который определяется по формуле (4). Для этого необходимо уменьшать объемы материала, расположенные под площадями трения подвижного V_n и неподвижного V_n трибоэлементов. Данное требование лучше всего выполнять уменьшением толщины материалов, что способствует быстрому выравниванию температур по глубине трибоэлементов. Данный параметр входит в формулу во второй степени, а следовательно, степень его влияния выше, чем остальных.
2. Увеличение температуропроводности материалов трибоэлементов. Высокая температуропроводность исключает возникновение температурных напряжений в подповерхностных слоях материалов трибоэлементов.

3. Увеличение трибологических свойств смазочной среды. Наличие в смазочных материалах поверхностно-активных веществ (ПАВ), а также противоизносных и противозадирных присадок, будет способствовать формированию износостойких пленок на поверхности материалов трибоэлементов.
4. Увеличение реологических свойств структуры сопряженных материалов, что выражается в способности структуры материалов превращать механические колебания в тепловую энергию и рассеивать ее в окружающей среде.

Коэффициент K_1 – чувствительность трибосистемы к внешним возмущениям, является безразмерным коэффициентом.

Коэффициент K_2 – снижает степень влияния входного сигнала на реакцию трибосистемы, это следует из дифференциальных уравнений, которые представлены в работе [1]. Следовательно, физический смысл коэффициента K_2 – это способность трибосистемы прирабатываться, безразмерная величина.

На основании анализа размерностей запишем выражение для определения коэффициента K_2 :

$$K_2 = \frac{Q \cdot a_{np} \cdot d_{фнк}}{W_{mp}} = \frac{K_{\phi}^2 \cdot a_{np}^2 \cdot E_y \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_u}{\pi}} \cdot d_{фнк}}{\dot{\epsilon}_{np} \cdot (W_n + W_u)}, \quad (11)$$

где $d_{фнк}$ – диаметр фактического пятна контакта, м;

W_n и W_u – скорость работы диссипации в подвижном и неподвижном трибосистемах, Дж/с.

Диаметр фактического пятна контакта $d_{фнк}$ зависит от нагрузки N , модуля упругости контактирующих материалов и величины шероховатости поверхностей трения. Рассчитывается согласно формул, которые приведены в работе [12].

Скорость работы диссипации в подвижном и неподвижном трибоэлементах рассчитывается по формулам работы [12]:

$$W_n = \sigma_{фнк} \cdot \dot{\epsilon}_n \cdot V_{\partial n} \cdot n, \quad (12)$$

$$W_u = \sigma_{фнк} \cdot \dot{\epsilon}_u \cdot V_{\partial u} \cdot n, \quad (13)$$

где n – количество пятен контакта, определяется по формулам работы [12].

Анализ формулы (11) позволяет определить пути улучшения прирабатываемости трибосистем:

1. Увеличение качества трибосистемы. Пути увеличения сформулированы выше.
2. Увеличение диаметра фактического пятна контакта. Эффективным способом является уменьшение шероховатости поверхностей трения Ra .
3. Уменьшение скорости работы диссипации в трибоэлементах. Согласно выражений (12) и (13) это можно выполнить следующими путями:
 - снижением напряжений на фактических пятнах контакта, уменьшая шероховатость поверхностей трения Ra ;
 - снижением скорости деформации в материалах трибоэлементов, например, увеличением модулей упругости материалов и диаметра фактического пятна контакта, формулы (7) и (8);
 - снижением объема материала подповерхностного слоя трибоэлементов, который участвует в деформации, например, применением смазочной среды с большим E_y , т.е. с содержанием ПАВ и присадок.

Объемы деформируемого материала рассчитываются по формулам (1) и (2), где глубина распространения деформации определяется по выражениям, которые приведены в работе [12]:

$$h_{\text{он}} = 0,5d_{\text{фнк}}(1 - e^{-D_n}), \quad (14)$$

где

$$D_n = \frac{6,5 \cdot 10^8 \cdot \sigma_{\text{фнк}}^2}{E_n \cdot E_y}, \quad (15)$$

$$h_{\text{он}} = 0,5d_{\text{фнк}}(1 - e^{-D_n}), \quad (16)$$

где

$$D_n = \frac{6,5 \cdot 10^8 \cdot \sigma_{\text{фнк}}^2}{E_n \cdot E_y}. \quad (17)$$

Постоянная времени T_1 , которая входит в дифференциальные уравнения изменения скорости изнашивания и коэффициента трения [1], характеризует инерционность трибосистемы при изменении внешних условий (нагрузки, скорости скольжения, трибологических свойств смазочной среды).

Физический смысл постоянной времени T_1 – это время, которое необходимо для стабилизации градиента температур по всему объему трибоэлемента с учетом температуропроводности материала при изменении внешних условий, размерность – секунда.

Используя методы анализа размерностей теории подобия и моделирования запишем выражение для определения T_1 :

$$T_1 = \frac{\pi \left(\sqrt[3]{V_{\text{np}}} \right)^2}{a_{\text{np}}} = \frac{\pi V_{\text{np}}^{0,666}}{a_{\text{np}}}, \text{с}, \quad (18)$$

где V_{np} – приведенный объем материала трибосистемы, определяется по формуле:

$$V_{\text{np}} = \frac{2 \cdot V_n \cdot V_n}{V_n + V_n}, \text{м}^3. \quad (19)$$

Постоянная времени T_1 входит в решения дифференциальных уравнений и определяет время приработки. Уменьшение T_1 будет способствовать уменьшению времени приработки. Как следует из выражения (18) для этого необходимо:

- уменьшать объем трибоэлементов, например, выполнять их тонкостенными или применять покрытия или пластины на поверхностях трения;
- увеличивать температуропроводность материалов трибоэлементов.

Постоянная времени T_2 , которая входит как в правую, так и в левую часть дифференциальных уравнений [1], характеризует время, за которое происходит перестройка поверхностных и подповерхностных слоев при изменении внешних условий, размерность – секунда. Это время, за которое происходит изменение шероховатости поверхностных слоев, процессы деформации и упрочнения подповерхностных слоев.

Используя методы анализа размерностей запишем выражение для определения T_2 :

$$T_2 = \frac{K_{\phi} \cdot h_{\text{онп}}}{\dot{\epsilon}_{\text{np}}}, \text{с}, \quad (20)$$

где

$$h_{\text{онп}} = \frac{2 \cdot h_{\text{он}} \cdot h_{\text{он}}}{h_{\text{он}} + h_{\text{он}}}, \text{м}. \quad (21)$$

Уменьшение постоянной времени T_2 способствует уменьшению времени приработки трибосистемы. Такой вывод следует из вида решений дифференциальных уравнений динамики процессов [1]. Как следует из выражения (20), для уменьшения T_2 необходимо выполнять следующие условия.

1. Уменьшение коэффициента формы трибосистемы, т.е. изменение конструкции трибосистемы. Малые значения коэффициента формы $K_\phi < 1$ соответствуют высшим кинематическим парам, у которых контакт трибоэлементов происходит в точке или по линии. Практика показывает, что также трибосистемы прирабатываются за минимальное время (несколько минут). Низшие кинематические пары, у которых контакт происходит по площади, а следовательно $K_\phi > 1 \dots 100$, прирабатываются длительно, иногда несколько часов.
2. Уменьшение глубины распространения деформации в подповерхностных слоях. Как следует из формул (14) – (17) на глубину деформации в материалах трибоэлементов влияет:
 - напряжение на пятнах фактического контакта $\sigma_{фнк}$, которые необходимо уменьшать;
 - модуль упругости материалов трибоэлементов E_n, E_n , который необходимо увеличивать;
 - трибологические свойства смазочной среды E_y , которые необходимо увеличивать.
3. Увеличение скорости деформации в подповерхностных слоях трибоэлементов. Пути увеличения $\dot{\epsilon}_n$ и $\dot{\epsilon}_n$ следуют из выражений (7) и (8). Анализ данных выражений позволяет сделать вывод, что величины $\sigma_{фнк}, E_n, E_n$ входят в противоречие с ранее сделанными выводами. Следовательно, величина T_2 будет иметь оптимальное значение для процесса приработки. Одним из параметров, которым можно управлять величиной T_2 , это скорость скольжения $v_{скл}$. Увеличение скорости скольжения приводит к увеличению скорости деформации при заранее выбранных и неизменных условиях.

Полученные выражения для расчета параметров динамических моделей K_1, K_2, T_1, T_2 позволяют определить декремент затухания колебаний во время переходного процесса по формулам, которые приведены в работе [1].

Полученные выражения для определения коэффициентов усиления K_1 , формула (10), K_2 , формула (11), а также постоянных времени T_1 , формула (18) и T_2 , формула (20), являются результатом параметрической идентификации моделей динамики переходных процессов в трибосистеме. При их подстановке в решения дифференциальных уравнений скорости изнашивания и коэффициента трения, представленных в работе [1], можно моделировать процесс приработки трибосистем для различных входных условий.

Выводы

1. Выполнена параметрическая идентификация динамических моделей процесса приработки трибосистем. Получены выражения для определения коэффициентов усиления и постоянных времени. Показано, что после их подстановки в решения дифференциальных уравнений можно моделировать процессы изменения скорости изнашивания и коэффициента трения во время приработки.
2. Определен физический смысл коэффициентов усиления и постоянных времени. Коэффициент K_1 определяет чувствительность трибосистемы к входному воздействию, а следовательно, величину «заброса» скорости изнашивания и коэффициента трения в процессе приработки. Коэффициент K_2 определяет способность трибосистемы прирабатываться. Постоянная времени T_1 – это время, которое необходимо для стабили-

зации градиента температур по всему объему трибоэлементов с учетом их теплопроводности. T_2 – это время, за которое происходит перестройка структуры поверхностных и подповерхностных слоев трибоэлементов, процессы деформации и упрочнения.

Литература

1. Бекиров А.Ш. Структурная идентификация математической модели переходных процессов в трибосистемах / Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів, 2017, № 7. –С. 109-120.
2. Огарков М.А. Методы статистического оценивания параметров случайных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1990. - 208 с.
3. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления. - М.: Наука, 1980. - 400 с.
4. Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Идентификация систем управления. - М.: Наука, 1974. – 248 с.
5. Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. - М.: Связь, 1976. - 496 с.
6. Семенов А.Д., Артамонов Д.В., Брюхачев А.В. Идентификация объектов управления: Учебн. пособие. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. - 211 с.
7. Современные методы идентификации систем/Под ред. П. Эйкхоффа. - М.: Мир, 1983. - 400 с.
8. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы: Учебное пособие для вузов. - СПб.: Питер, 2005. - 336 с.
9. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И.Седов. – М. : Наука, 1981. – 448 с.
10. Веников В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников, Г.В. Веников. – М. : Высшая школа, 1991. – 439 с.
11. 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.
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 трибологии. – 2015. – № 1. – С. 49-57.
13. Войтов В.А. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин / В.А. Войтов, О.М. Яхно, Ф.Х. Аби-Сааб. – К.: КПИ, 1999. – 192 с.
14. Войтов В.А., Захарченко М.Б. Интегральный параметр оценки трибологических свойств смазочных материалов /Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. Том 2. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 151. – С. 5 – 10.
15. Захарченко М.Б. Методика оценки реологических свойств структуры сопряженных материалов в трибосистеме / Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 158: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. – С. 64-69.
16. Войтов В.А., Захарченко М.Б. Добротность трибосистемы, как функция износостойкости и потерь на трение / MOTROL, LUBLIN-RZESZOW – 2015, Vol. 17, - № 7. – С. 93 – 98.

Summary

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

The parametric identification of the dynamic models of the tribosystem run-in process is performed. Expressions for determining the gain and time constants are obtained. It is shown that after their substitution in the solution of differential equations it is possible to simulate the processes of changing the wear rate and the coefficient of friction during run-in.

The physical meaning of the gain and time constants is determined. Coefficient K_1 determines the sensitivity of the tribosystem to the input effect, and consequently, the value «casting» wear rate and coefficient of friction during overtaking. Coefficient K_2 determines the ability of tribofite to be worked on. Time constant T_1 – this time, which is necessary to stabilize the temperature gradient over the entire volume of triboelements taking into account their thermal diffusivity. T_2 – this is the time for which the structure of the surface and subsurface layers of the triboelements is rearranged, the processes of deformation and hardening.

Keywords: tribosystem, modeling, transitional processes, running, wear rate, coefficient of friction, parametric identification, gain factors, time constants

References

1. Bekirov A.S.H. Strukturnaya identifikatsiya matematicheskoy modeli perekhodnykh protsessov v tribosistemakh / Tekhnichniy servis agropromislovogo, lisovogo i transportnogo kompleksiv, 2017, № 7. –S. 109-120.
2. Ogarkov M.A. Metody statisticheskogo otsenivaniya parametrov sluchaynykh protsessov. M.: Energoatomizdat, 1990. - 208 s.
3. Saridis Dzh. Samoorganizuyushchiyesya stokhasticheskiye sistemy upravleniya. - M.: Nauka, 1980. - 400 s.
4. Seydzh E.P., Melsa Dzh.L. Identifikatsiya sistem upravleniya. - M.: Nauka, 1974. - 248 s.
5. Seydzh E.P., Melsa Dzh.L. Teoriya otsenivaniya i yeye primeneniye v svyazi i upravlenii. - M.: Svyaz', 1976. - 496 s.
6. Semenov A.D., Artamonov D.V., Bryukhachev A.V. Identifikatsiya ob"yektov upravleniya: Uchebn. posobiye. - Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2003. - 211 s.
7. Sovremennyye metody identifikatsii sistem/Pod red. P. Eykkhoffa. - M.: Mir, 1983. – 400 s.
8. Miroschnik I.V. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Li- neynyye sistemy: Uchebnoye posobiye dlya vuzov. - SPb.: Piter, 2005. - 336 s.
9. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike / L.I.Sedov. – M. : Nauka, 1981. – 448 s.
10. Venikov V.A. Teoriya podobiya i modelirovaniya / V.A. Venikov, G.V. Venikov. – M. : Vysshaya shkola, 1991. – 439 s.
11. Voytov V.A., Isakov D.I. Modelirovaniye granichnogo treniya v tribosistemakh. ÍÍ. Metodika matematicheskogo modelirovaniya statsionarnykh protsessov pri granichnom trenii // Treniye i iznos. – 1996. – T.17, №4. – S. 456-462.
12. Voytov V.A., Zakharchenko M.B. Modelirovaniye protsessov treniya iznashivaniya v tribosistemakh v usloviyakh granichnoy smazki. Chast' 1. Raschet skorosti raboty dissipatsii v tribosistemakh // Problemi tribologii. – 2015. – № 1. – S. 49-57.
13. Voytov V.A. Printsipy konstruktivnoy iznosostoykosti uzlov treniya gidromashin / V.A. Voytov, O.M. Yakhno, F.KH. Abi-Saab. – K.: KPI, 1999. – 192 s.

14. Voytov V.A., Zakharchenko M.B. Integral'nyy parametr otsenki tribologicheskikh svoystv smazochnykh materialov /Zbírnik naukovikh prats' Ukraíns'koí derzhavnoí akademíi zalíznichnogo transportu. Tom 2. – Kharkív: UkrDAZT, 2015. – Vip. 151. – S. 5 – 10.
15. Zakharchenko M.B. Metodika otsenki reologicheskikh svoystv struktury sopryazhennykh materialov v tribosisteme / Vísnik Kharkívs'kogo natsíonal'nogo tekhníchnogo uníversitetu síl's'kogo gospodarstva ím. P. Vasilenka. – Kharkív: KHNTUSG, 2015. – Vip. 158: Resursozberígayuchí tekhnologíi, materíali ta obladnannya u remontnomu virobnitství. – S. 64-69.
16. Voytov V.A., Zakharchenko M.B. Dobrotnost' tribosistemy, kak funktsiya iznosostoykosti i poter' na treniye / MOTROL, LUBLIN-RZESZOW – 2015, Vol. 17, - № 7. – S. 93 – 98.