

**Войтов В.А.,
Козырь А.Г.**

Харьковский национальный технический
университет с/х им. П. Василенко,
г. Харьков, Украина
E-mail: ndch_khntusg@mail.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ В ТРИБОСИСТЕМАХ.
ЧАСТЬ 1. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

УДК 621.891

В работе приведены теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию методики моделирования переходных процессов в трибосистемах и критериям оценки таких процессов. Критерии оценки получены в виде коэффициентов дифференциальных уравнений, которые описывают переходный процесс. Показано, что предложенные коэффициенты имеют определенный физический смысл и характеризуют реакцию трибосистемы на входное возмущение (изменение нагрузки, скорости скольжения и т.д.).

Ключевые слова: трибосистема, моделирование, скорость изнашивания, сила трения, переходный процесс.

Актуальность проблемы

Надежность конструкций машин и механизмов закладывается на этапе проектирования и неразрывно связана с разработкой и совершенствованием расчетных методов. Как показывает практика проектирования методы расчета на износостойкость и прогнозирования ресурса используются ограничено и имеют значительное отставание от методов расчета на прочность.

Отсутствие расчетов на износостойкость и прогнозирование ресурса не позволяет конструктору выбрать оптимальный вариант технического решения и тем более определить рациональные режимы обкатки и эксплуатации. В результате машина проектируется с «запасом надежности» по износостойкости, либо имеет недостаточный ресурс, что приводит к простоям и ремонту в процессе эксплуатации.

Трудности, которые возникают при разработке расчетных методов на износостойкость, связаны с большим разнообразием сложных по своей природе процессов, протекающих на поверхностях трения трибоэлементов и влиянием на эти процессы большого количества факторов. Особенно трудно поддаются моделированию с последующим прогнозированием ресурса переходные процессы, например, обкатка или приработка.

Согласно опубликованным работам износ за время обкатки соизмерим износу за период эксплуатации. Поэтому учет величины износа за время обкатки является необходимым звеном в методиках и методах расчета на износостойкость на этапе проектирования новых машин.

Исходя из вышеизложенного, разработка методов расчета износостойкости трибосистем с учетом приработки является актуальной задачей, направленной на повышение ресурса машин и оборудования.

Анализ публикаций, посвященных данной проблеме

При разработке моделей по расчету износа и прогнозированию ресурса используют в основном вероятностные подходы [1 - 5]. Построение таких моделей базируется на расчетах характеристик контакта и методах описания шероховатости поверхности [6].

В работе [7] дается анализ современного состояния методов расчета износа и прогнозирования ресурса и делается вывод, что аналитические методы не позволяют учитывать динамику изменения параметров режимов работы контакта, а перспективными представляются численные методы.

В работе [8] 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 [9 - 11] 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.

После проведения параметрической идентификации трибосистемы, которая имеет цель определение коэффициентов входящих в дифференциальные уравнения, авторами работ [10, 11] получены зависимости для их определения. Из анализа представленных зависимостей по определению коэффициентов следует, что для выполнения моделирования переходных процессов необходим предварительный лабораторный тестовый эксперимент или испытания натуральных образцов.

Как следует из изложенного выше, обязательное наличие тестового эксперимента перед моделированием снижает ценность разработанной методики.

Анализируя накопленный опыт при решении подобных задач можно сделать вывод, что такие функциональные зависимости рациональнее получать в виде регрессионных уравнений, где в виде варьируемых факторов будут выступать объединенные комплексы параметров.

Цель исследований

Определить и теоретически обосновать критерии оценки переходных процессов в трибосистемах, а также их функциональные зависимости от величины входного воздействия на трибосистему.

Методический подход в проведении исследований

Согласно работам [10, 11] дифференциальные уравнения для моделирования переходных процессов в трибосистемах представлены в следующем виде:

Для моделирования переходного процесса скорости износа:

$$aI_V + I_V = b_1 \delta_i + b_2 \delta_i, \quad (1)$$

где $a = T_{1i}$;

$b_1 = K_{1i}(1 - K_{2i})$;

$b_2 = K_{1i}T_{1i}$;

K_{1i} и K_{2i} – коэффициент усиления;

T_{1i} – постоянная времени переходного процесса для скорости изнашивания;

δ_i – относительное отклонение входного воздействия на трибосистему:

$$\delta_i = \frac{I_{i\text{тек}} - I_{i\text{баз}}}{I_{i\text{баз}}}, \quad (2)$$

где $I_{i\text{тек}}$ – текущее значение входного воздействия на трибосистему, определяются по формуле [10]:

$$I_{i\text{тек}} = \frac{N_{\text{тек}}^{2/3} \cdot V_{\text{тек}}^{2/3} \cdot \alpha_{\text{тек}}^{7/3}}{(A_{\text{уср.тек}} \cdot Q_{\text{тек}})^{1/3} \cdot K_{\phi.\text{тек}}^{2/3}}, \quad (3)$$

$I_{i\text{баз}}$ – базовое значение входного воздействия, определяется по формуле:

$$I_{i\text{баз}} = \frac{N_{\text{баз}}^{2/3} \cdot V_{\text{баз}}^{2/3} \cdot \alpha_{\text{баз}}^{7/3}}{(A_{\text{уср.баз}} \cdot Q_{\text{баз}})^{1/3} \cdot K_{\phi.\text{баз}}^{2/3}}, \quad (4)$$

где N – нагрузка на узле трения, Н;

V – скорость скольжения, м/с;

α – параметр, учитывающий релаксационные свойства структуры сопряженных материалов и их совместимость в трибосистеме, дВ/м;

$A_{\text{уср}}$ – параметр, характеризующий смазывающие свойства среды, Дж/м³;

Q – расход смазочной среды через узел трения, кг/с;

K_{ϕ} – коэффициент, учитывающий геометрические размеры узла трения (коэффициент формы), 1/м.

Методики определения параметров α , $A_{\text{уср}}$, K_{ϕ} изложены в работах [9, 12].

За базовое значение выбирают минимально возможную величину для условий моделирования.

Для моделирования переходного процесса силы трения:

$$c_2 F_{TP} + c_1 F_{TP} + \bar{F}_{TP} = d_3 \delta_i + d_2 \delta_i + d_1 \delta_i, \quad (5)$$

где $c_2 = T_{1F} T_{2F}$;

$c_1 = T_{1F} + T_{2F}$;

$d_3 = K_{3F} T_{1F} T_{2F}$;

$d_2 = K_{1F}(T_{1F} + T_{2F} - K_{2F} T_{2F} + K_{3F} T_{1F})$;

$d_1 = K_{1F}(1 - K_{2F} + K_{3F})$;

K_{1F} , K_{2F} , K_{3F} – коэффициенты усиления;

T_{1F} и T_{2F} – постоянные времени переходного процесса для силы трения.

На основании анализа представленных дифференциальных уравнений (1) и (5), а также на основании анализа структурно-динамических схем моделирования скорости изнашивания и силы трения представленных на рис. 1, 2 можно определить физический смысл коэффициентов усиления K и постоянных времени T .

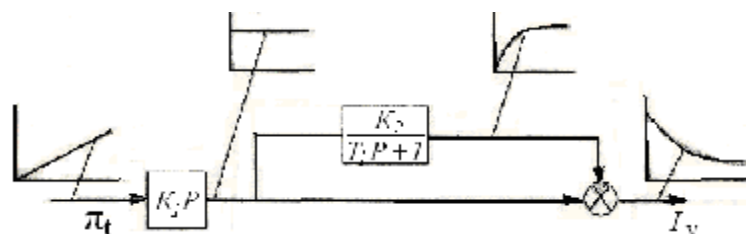


Рис. 1 – Структурно-динамическая схема моделирования скорости изнашивания [10]:

K – коэффициенты усиления;
 T – постоянная времени;
 P – оператор дифференцирования

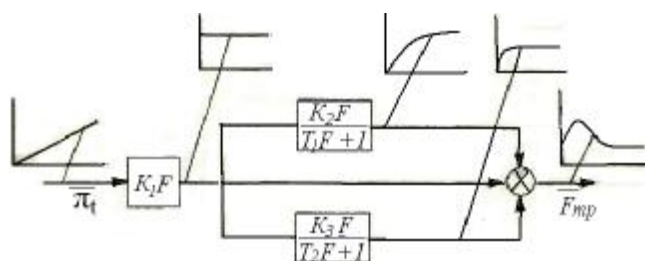


Рис. 2 – Структурно-динамическая схема моделирования силы трения [10]:

K – коэффициенты усиления;
 T – постоянная времени;
 P – оператор дифференцирования

1. Коэффициенты усиления K_{1I} и K_{1F} определяют реакцию трибосистемы на возмущение, т.е. определяют чувствительность трибосистемы. Увеличение коэффициентов K_1 будет характеризовать начальное максимальное значение скорости изнашивания и начальный заброс силы трения трибосистемы. Поэтому величины коэффициентов K_{1I} и K_{1F} могут выступать критериями оценки чувствительности трибосистемы к внешним воздействиям.

2. Коэффициенты усиления K_{2I} и K_{2F} определяют значение скорости изнашивания и силы трения трибосистемы на установившемся режиме, т.е. после завершения переходного процесса. Увеличение коэффициентов K_2 будет характеризовать уменьшение скорости изнашивания и силы трения. Поэтому величины коэффициентов K_{2I} и K_{2F} могут выступать критериями оценки величин скорости изнашивания и силы трения, по которым можно судить о ресурсе и механических потерях в трибосистемах и производить их ранжирование.

3. Коэффициент усиления K_{3F} определяет величину максимального заброса силы трения во время переходного процесса, Увеличение коэффициента K_{3F} будет характеризовать увеличение заброса силы трения в процессе приработки. Поэтому величина коэффициента K_{3F} может выступать критерием оценки механических потерь в трибосистеме в процессе приработки.

4. Постоянные времени T_{1I} , T_{1F} и T_{2F} определяют время завершения переходного процесса, т.е. инерционные свойства трибосистемы. Увеличение значений T_1 делает процесс приработки длительным и слабо выраженным. И наоборот, уменьшение значений постоянных времени будет характеризовать сокращение времени переходного процесса. Поэтому величины постоянных времени T_1 могут выступать критериями оценки приработки трибосистем.

Результаты исследований

Дальнейшие исследования направлены на разработку алгоритма определения коэффициентов усиления K_I и постоянных времени T_I и построение расчетных функциональных зависимостей перечисленных критериев от величины входного воздействия на трибосистему.

Реакция трибосистемы на входное воздействие, т.е. чувствительность трибосистемы, величины скорости изнашивания и силы трения на установившемся режиме, механические потери за время переходного процесса, а также длительность переходного процесса зависит от трех объединенных комплекс-факторов:

$$\frac{NV}{K_{\phi}} = W; \quad \alpha; \quad A_{уср} \cdot Q = A_y,$$

где первый комплекс характеризует условия нагружения трибосистемы. Физический смысл этого комплекса – мощность подводимая к трибосистеме, геометрическим параметром которого является коэффициент формы, размерность (Н·м·м)/с = Вт·м;

- второй комплекс – характеризует релаксационные свойства структуры обоих сопряженных материалов и их совместимость между собой, размерность дВ/м;

- третий комплекс – характеризует смазочную среду и ее расход через узел трения. Физический смысл этого комплекса заключается в способности единицы массы смазочной среды проявлять свои трибологические свойства в единицу времени, размерность Дж·кг/м³·с.

Поэтому в дальнейших исследованиях будем определять взаимосвязь критериев переходного процесса скорости изнашивания от перечисленных выше объединенных комплексов в виде:

$$K_{1I} = f(W, \alpha, A_y); \quad (6)$$

$$K_{2I} = f(W, \alpha, A_y); \quad (7)$$

$$T_{1I} = f(W, \alpha, A_y). \quad (8)$$

Алгоритм определения зависимостей (6), (7), (8) состоит из следующих расчетных операций.

1. Задавшись текущими значениями объединенных комплексов, по величинам которых будет производиться моделирование, определяют максимальное значение скорости изнашивания во время переходного процесса I_{Vmax} ; значение скорости изнашивания после завершения приработки (на установившемся режиме работы) $I_{Vуст}$ и время приработки t_{np} .

Данные параметры определяют по регрессионным зависимостям, которые получают на основе тестовых экспериментов.

2. Задавшись базовыми значениями объединенных комплексов, которые незначительно меньше текущих и выбираются произвольно, по регрессионному уравнению определяют базовое значение скорости изнашивания, которое соответствует установившемуся режиму работы, т.е. после завершения приработки, $I_{Vбаз}$.

3. Рассчитывают коэффициент K_{1I} , который согласно работы [11] определяют:

$$K_{1I} = \frac{(I_{Vmax} - I_{Vбаз})}{I_{Vбаз}} \cdot \frac{\mathfrak{R}_{tбаз}}{(\mathfrak{R}_{tвек} - \mathfrak{R}_{tбаз})}. \quad (9)$$

4. Рассчитывают коэффициент K_{2I} , который согласно работы [11] определяют:

$$K_{2I} = \frac{(I_{Vmax} - I_{Vуст})}{(I_{Vmax} - I_{Vбаз})} \cdot \frac{\mathfrak{R}_{tбаз}}{(\mathfrak{R}_{tвек} - \mathfrak{R}_{tбаз})}. \quad (10)$$

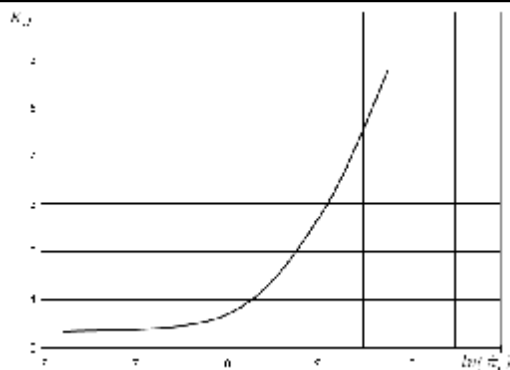
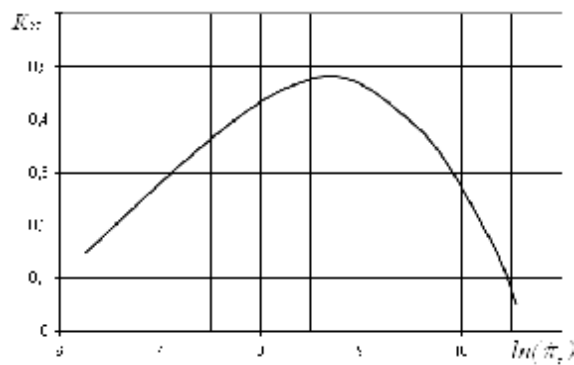
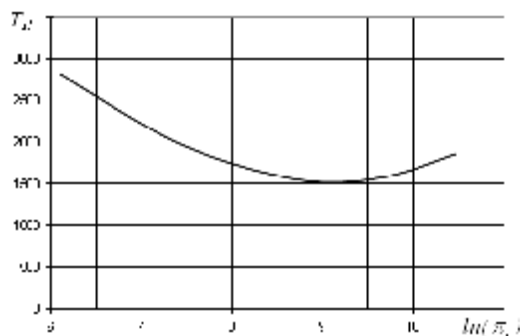
5. Рассчитывают постоянную времени T_{1I} , которую согласно работы [11] определяют:

$$T_{1I} = \frac{t_{np}}{3}. \quad (11)$$

Согласно проведенных расчетов были построены следующие зависимости, представленные на рис. 3, 4, и 5 Зависимости K_{1I} , K_{2I} и T_{1I} от параметра входного воздействия удобнее отображать в логарифмических координатах, $\ln(\mathfrak{R}_i)$.

Как следует из представленных зависимостей коэффициент усиления K_{1I} , рис. 3, однозначно определяет чувствительность трибосистемы к возмущениям. Чем больше величина входного возмущения, тем больше будет величина заброса скорости изнашивания в начальный период работы трибосистемы. При определенной величине входного воздействия \mathfrak{R}_i наступит повреждаемость, т.е. выход из строя трибосистемы. Поэтому большая величина K_{1I} в эксплуатации не даст большого ресурса для трибосистемы. Необходимо на этапе проектирования трибосистем стремиться к снижению значений K_{1I} .

Для этого необходимо, как следует из формулы (9), уменьшать разницу между максимальной величиной скорости износа на начальном этапе и установившейся (базовой) величиной скорости износа после завершения приработки. Это возможно выполнить правильным подбором материалов в узел трения, смазочной среды к ним, геометрии узла трения, или эксплуатировать трибосистему, на пониженных нагрузках, т.е. при минимальных значениях \mathfrak{R}_i .

Рис. 3 – Зависимость коэффициента усиления K_{1L} от величины входного воздействия A_7 Рис. 4 – Зависимость коэффициента усиления K_{2L} от величины входного воздействия A_7 Рис. 5 – Зависимость постоянной времени T_{1L} от величины входного воздействия A_7

Коэффициент усиления K_{2L} , рис. 4, определяет значение величины скорости изнашивания после завершения приработки. Как следует из зависимости представленной на рис. 4, существует оптимальное значение величины входного воздействия A_7 , при котором процесс приработки будет оптимальным, т.е. величина скорости изнашивания после завершения процесса будет минимальной и время для завершения процесса тоже будет минимальным, рис. 5. Поэтому на этапе проектирования трибосистем необходимо стремиться к оптимальным значениям K_{2L} и T_{1L} . Изменять эти коэффициенты, как следует из формул (10 и 11), можно с помощью параметра A_7 , формула (3), а, следовательно: материалами, смазочной средой, геометрией узла, нагрузкой, скоростью скольжения. По оптимальному значению A_7 можно определить режимы приработки трибосистемы. Эта величина на графиках 4 и 5 соответствует оптимумам K_{2L} и T_{1L} .

Физически это объяснимо. При низких значениях входного воздействия энергии для перестройки поверхностных слоев и изменения шероховатости недостаточно и процесс приработки происходит медленно. Это будет характеризоваться большой величиной скорости изнашивания после завершения приработки (малые значения K_{2L}) и длительностью процесса приработки (большие значения T_{1L}). При больших значениях входного сигнала процесс будет также неэффективным из-за интенсивного образования поверхностных пленок и быстрого их разрушения. Процесс приработки становится плохо выраженным.

Поэтому расчет и анализ критериев переходного процесса в виде коэффициентов K_{1L} , K_{2L} и T_{1L} , на этапе проектирования трибосистем, позволит конструктору выбрать оптимальные режимы их обкатки (приработки), по значениям оптимумов K_{2L} и T_{1L} , и оптимальные режимы эксплуатации, повышение которых нежелательно, по значениям коэффициента K_{1L} .

Согласно разработанного методического подхода определим взаимосвязь критериев переходного процесса силы трения от объединенных комплексов в виде:

$$K_{1F} = f(W, \alpha, A_y); \quad (12)$$

$$K_{2F} = f(W, \alpha, A_y); \quad (13)$$

$$K_{3F} = f(W, \alpha, A_y); \quad (14)$$

$$T_{1F} = f(W, \alpha, A_y); \quad (15)$$

$$T_{2F} = f(W, \alpha, A_y); \quad (16)$$

Алгоритм определения зависимостей (12) - (16) состоит из следующих расчетных операций.

1. Для заданных текущих значений объединенных комплексов выбирают текущее значение параметров и по формуле (3) рассчитывают текущее значение $\mathfrak{R}_{t_{тек}}$. По регрессионным зависимостям, которые получены на основании тестового эксперимента определяют начальный заброс силы трения F_0 , максимальное значение силы трения в процессе приработки $F_{mp.max}$, значение силы трения после завершения приработки $F_{mp.уст}$, время, когда сила трения достигает максимального значения t_{max} и время, когда производная функции $F_{mp}(t)$ меняет свой знак t^* .

2. Для заданных базовых значений объединенных комплексов, которые выбираются произвольно и меньше текущих значений определяют $\mathfrak{R}_{t_{баз}}$ по формуле (4) и по регрессионному уравнению значение силы трения на установившемся режиме для базовых рабочих параметров $F_{mp.баз}$.

3. Рассчитывают коэффициент K_{1F} , который согласно работы [11] равен:

$$K_{1F} = \frac{(F_0 - F_{mp.баз}) \cdot \mathfrak{R}_{t_{баз}}}{F_{mp.баз} \cdot (\mathfrak{R}_{t_{тек}} - \mathfrak{R}_{t_{баз}})}. \quad (17)$$

Нахождение коэффициентов K_{2F} и K_{3F} будем производить из системы двух уравнений, которая приведена в работе [11]:

$$\bar{F}_{mp.уст} = K_{1F} (1 - K_{2F} + K_{3F}) \cdot \frac{\mathfrak{R}_{t_{баз}}}{(\mathfrak{R}_{t_{тек}} - \mathfrak{R}_{t_{баз}})}, \quad (18)$$

$$\bar{F}_{max} = K_{1F} (1 - K_{2F} \cdot a + K_{3F} \cdot b) \cdot \frac{\mathfrak{R}_{t_{баз}}}{(\mathfrak{R}_{t_{тек}} - \mathfrak{R}_{t_{баз}})}, \quad (19)$$

где
$$a = 1 - e^{-\left(\frac{t_{max}}{T_{1F}}\right)}, \quad (20)$$

$$b = 1 - e^{-\left(\frac{t_{max}}{T_{2F}}\right)}, \quad (21)$$

где
$$T_{1F} = \frac{t_{np}}{3}, \quad (22)$$

$$T_{2F} = \frac{t^*}{3}. \quad (23)$$

Определим относительные величины максимального значения силы трения и силы трения на установившемся режиме. Согласно теории линейных дифференциальных уравнений такие величины определяются как:

$$\bar{F}_{mp.уст} = \frac{F_{mp.уст} - F_{mp.баз}}{F_{mp.баз}}; \quad (24)$$

$$\bar{F}_{mp.max} = \frac{F_{mp.max} - F_{mp.баз}}{F_{mp.баз}}. \quad (25)$$

1. Величину коэффициента K_{3F} выразим из уравнения (18), которая с учетом формул (2) и (24) примет вид:

$$K_{3F} = \frac{\bar{F}_{mp.уст}}{\mathfrak{R}_{t_{тек}} \cdot K_{1F}} + K_{2F} - 1. \quad (26)$$

2. Подставив формулы (26) в формулу (19), получим значение K_{2F} , которое с учетом формул (25) и (2) примет вид:

$$K_{2F} = \frac{\bar{F}_{mp.max} - b \bar{F}_{mp.уст} + K_{1F} \mathfrak{R}_{t_{тек}} (b-1)}{K_{1F} \mathfrak{R}_{t_{тек}} (b-a)}. \quad (27)$$

Согласно проведенных расчетов были построены зависимости, представленные на рис. 6 - 10.

Как следует из представленных зависимостей коэффициент усиления K_{1F} , рис. 6, как и в случае изменения скорости изнашивания, определяет чувствительность трибосистемы к внешним возмущениям.

Только в отличие от скорости изнашивания зависимость изменения коэффициента K_{1F} для силы трения носит линейный и монотонно возрастающий характер. Это можно объяснить механизмом формирования шероховатости поверхности, который связан с деформационной составляющей материалов узла трения.

В целом, величина коэффициента K_{1F} , так же как и величина коэффициента K_{1I} , определяет границу перехода от нормального износа к повреждаемости. Поэтому величины коэффициентов K_{1F} и K_{1I} могут выступать критериями оценки чувствительности трибосистемы к внешним воздействиям, характеризуя при этом максимальную величину заброса скорости изнашивания и величину деформационной составляющей силы трения.

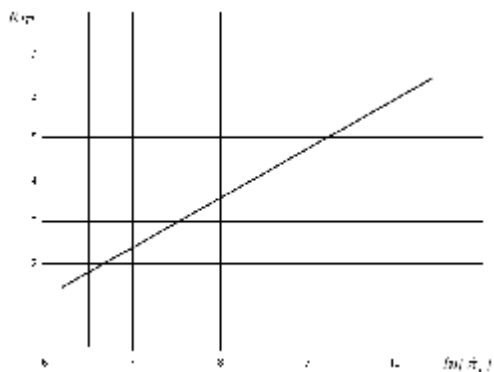


Рис. 6 – Зависимость коэффициента усиления K_{1F} от величины входного воздействия \mathcal{A}_i

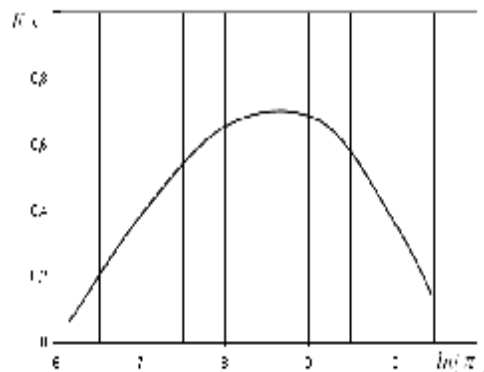


Рис. 7 – Зависимость коэффициента усиления K_{2F} от величины входного воздействия \mathcal{A}_i

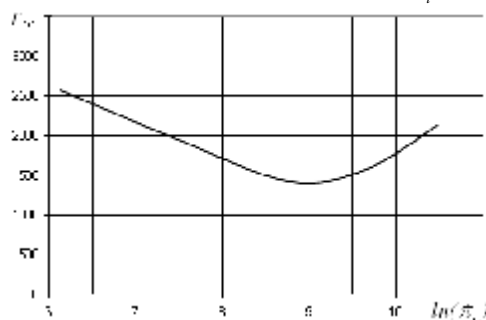


Рис. 8 – Зависимость постоянной времени T_{1F} от величины входного воздействия \mathcal{A}_i

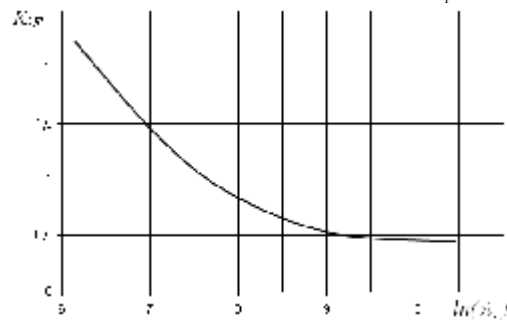


Рис. 9 – Зависимость коэффициента усиления K_{3F} от величины входного воздействия \mathcal{A}_i

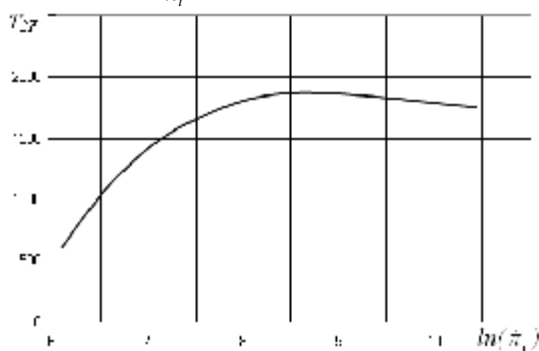


Рис. 10 – Зависимость постоянной времени T_{2F} от величины входного воздействия \mathcal{A}_i

Коэффициент усиления K_{2F} и постоянная времени T_{1F} , рис. 7 и 8, так же как и в случае скорости изнашивания определяют характер протекания процесса приработки. На рис. 7 и 8 отражены оптимальные режимы $\mathcal{A}_{i\text{тек}}$, при которых процесс приработки (связанный с формированием оптимальной шероховатости поверхности) будет проходить наиболее эффективно. Если сравнить зависимости на рис. 4, 5, и рис. 7, 8, становится очевидным, что оптимальные режимы для проведения эффективной приработки как по скорости изнашивания, так и по силе трения совпадают.

Такой подход позволяет на этапе проектирования трибосистем новых машин расчетным путем определить характер изменения коэффициентов усиления K_{2I} и K_{2F} , а также постоянных времени T_{1I} и T_{1F} во всем эксплуатационном диапазоне и выбрать рациональные нагрузочно-скоростные режимы (величину входного воздействия), при которых процесс приработки (обкатки) будет наиболее эффективным.

Существенным отличием при моделировании силы трения, по сравнению со скоростью изнашивания, является наличие второго инерциального звена, а следовательно и наличие коэффициента усиления K_{3F} и постоянной времени T_{2F} . Коэффициент усиления K_{3F} определяет величину максимального заброса силы трения во время переходного процесса, а постоянная времени T_{2F} определяет длительность этого процесса. На рис. 9 и 10 представлены зависимости изменения этих величин при изменении входного воздействия на трибосистему. Из представленных зависимостей следует, что коэффициент усиления K_{3F} имеет асимптотически убывающий характер, и при достаточно высоких значениях входного воздействия на трибосистему может быть равен нулю.

При $K_{3F} = 0$ процесс приработки проходит без заброса величины силы трения. При этом время приработки будет увеличиваться, рис. 10, а процесс становится слабо выраженным.

Величины K_{3F} и T_{2F} только дополняют характер поведения трибосистемы в процессе приработки, который достаточно описывается величинами K_{2I} , K_{2F} и T_{1I} , T_{1F} . Однако характер этих зависимостей показывает, что величина K_{3F} не должна стремиться к нулю.

Выводы

1. Определены критерии оценки переходных процессов в трибосистемах в качестве которых выступают коэффициенты усиления и постоянные времени дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс.

2. Коэффициенты усиления K_{1I} и K_{1F} определяют реакцию трибосистемы на возмущение, т.е. чувствительность трибосистемы. Чем больше значение коэффициентов K_1 , тем больше будет заброс скорости изнашивания и силы трения во время переходного процесса. Большие забросы этих параметров приведут к потере устойчивости трибосистемы, т.е. к переходу от нормального износа к повреждаемости. Поэтому оптимальным диапазоном эксплуатации трибосистем будут диапазоны с малыми значениями K_1 .

3. Коэффициенты усиления K_{2I} и K_{2F} , а также постоянные времени T_{1I} и T_{1F} имеют явно выраженный оптимум и определяют режимы рациональной приработки трибосистем. Прирабатывая трибосистему на режимах, соответствующих K_{2opt} и T_{1opt} , будут обеспечены минимальные значения скорости изнашивания и силы трения после завершения приработки и минимальное время приработки. Это сократит время обкатки трибосистемы и увеличит его ресурс в процессе дальнейшей эксплуатации.

4. Коэффициент усиления K_{3F} постоянная времени T_{2F} определяют величину максимального заброса силы трения в процессе приработки. Увеличение K_{3F} способствует уменьшению T_{2F} и характеризует механические потери в трибосистеме в процессе приработки.

Литература

- Кузьменко А.Г. Влияние статистической неоднородности, размеров и кинематических условий на износ поверхностей трения // Трение и износ. – 1985. – Т.6, № 3. – С. 432-441.
- Тартаковский И.Б. Корреляционное уравнение износа // Вестник машиностроения. – 1968. – № 2.
- Бендерский А.М. Вероятностная модель износа детали // Надежность и контроль качества. – 1970. – № 5. – С. 13-24.
- Костецкий Б.И., Стрельников В.П., Таций В.Г. Марковская модель износа и прогнозирование долговечности изнашиваемых деталей // Проблемы трения и изнашивания. – 1976. – № 10. – С. 10-15.
- Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
- 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.
- Сорокатый Р.В. Анализ современного состояния методов расчета износа и прогнозирования ресурса // Проблемы трибологии. – 2007. – №1. – С. 23-36.
- Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов. – Хмельницкий: ХНУ, 2009. – 242 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- Войтов В.А. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин / В.А. Войтов, О.М. Яхно, Ф.Х. Аби-Сааб. – К.: КПИ, 1999. – 192 с.

Vojtov V.A., Kozyr A.G. **Simulation of transient processes in the tribosystem. Part 1. Criteria for evaluation transient processes.**

The paper presents the theoretical and experimental studies to validate a method of modeling of transients in tribosystem and evaluation criteria of such processes. Criteria for evaluation were obtained in the form of coefficients of the differential equations which describe transient process. It is shown that the proposed coefficients have definite physical meaning and the response of tribosystem on input disturbance (change in load, sliding velocity, etc.).

Key words: tribosystem, modeling, wear rate, friction force, transition process.

References

1. Kuz'menko A.G. Vlijanie statisticheskoj neodnorodnosti, razmerov i kinematiceskikh uslovij na iznos poverhnostej trenija *Trenie i iznos*, 1985, T.6, No 3, pp. 432-441.
2. Tartakovskij I.B. Korreljacionnoe uravnenie iznosa *Vestnik mashinostroenija*, 1968, No 2.
3. Benderskij A.M. Verojatnostnaja model' iznosa detali *Nadezhnost' i kontrol' kachestva*, 1970, No 5, pp. 13-24.
4. Kosteckij B.I., Strel'nikov V.P., Tacij V.G. Markovskaja model' iznosa i prognozirovanie dolgovechnosti iznashivaemyh detalej *Problemy trenija i iznashivanija*, 1976, No 10, pp. 10-15.
5. Bogdanoff Dzh., Kozin F. Verojatnostnye modeli nakoplenija povrezhdenij, *Per. s angl.* M, Mir, 1989, 344 p.
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, No1, pp. 85-91.
7. Sorokatj R.V. Analiz sovremennogo sostojanija metodov rascheta iznosa i prognozirovanija resursa *Problemi tribologii*, 2007, No1, pp. 23-36.
8. Sorokatj R.V. Metod tribojelementov, *Hmel'nickij, HNU*, 2009, 242 p.
9. Vojtov V.A., Isakov D.I. Modelirovanie granichnogo trenija v tribosistemah. I. Metodika fizicheskogo modelirovanija, *Trenie i iznos*, 1996, T.17, No3, pp. 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, No 4, pp. 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, No 5, pp. 598-605.
12. Vojtov V.A., Jahno O.M., Abi-Saab F.H. Principy konstruktivnoj iznosostojkosti uzlov trenija gidromashin, K., KPI, 1999, 192 p.