

УДК 621.891

В.А.Войтов, проф., д-р техн. наук, А.Г. Козырь, асп.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко

Критерии моделирования силы трения на переходных режимах

В работе обоснованы критерии для моделирования потерь на трение на переходных режимах в трибосистемах. Критерии получены в виде коэффициентов, входящих в дифференциальные уравнения, описывающих переходной процесс. Показано, что основу таких критериев составляют постоянные времени и коэффициенты усиления, которые имеют определенный физический смысл и характеризуют реакцию трибосистемы на различные возмущения.

трибосистема, сила трения, переходный процесс, коэффициенты усиления, постоянные времени

В.А. Войтов, проф., А.Г. Козир

Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенко

Критерії моделювання сили тертя на перехідних режимах

В роботі обґрунтовані критерії для моделювання втрат на тертя на перехідних режимах в трибосистемах. Критерії отримані у вигляді коефіцієнтів, що входять в диференціальні рівняння, що описують перехідний процес. Показано, що основу таких критеріїв складають постійні часу і коефіцієнти підсилення, які мають певний фізичний зміст і характеризують реакцію трибосистеми на різні збурювання.

трибосистема, сила тертя, перехідний процес, коефіцієнти підсилення, постійні часу

Актуальность. На этапе проектирования новых сельскохозяйственных машин и механизмов конструктору необходимо оценить не только ресурс входящих в машину трибосистем, но и потери на трение. Большие значения сил трения в трибосистемах будут вызывать повышение температуры в процессе работы, а также повышенный расход топлива или электроэнергии приводными двигателями.

Анализ публикаций по данной проблеме.

Авторами работы [1] обоснованы и выбраны критерии для моделирования скорости изнашивания на переходных режимах. В работе показано, что коэффициенты, которые входят в дифференциальное уравнение, имеют физический смысл и оптимальные значения для сокращения времени приработки и снижения износа за время приработки.

Данная работа является продолжением работ [1, 2] и направлена на обоснование критериев моделирования силы трения в трибосистемах на переходных режимах.

Целью данной работы явилось обосновать критерии моделирования потерь на трение в трибосистемах и объяснить их физический смысл.

Методический подход в проведении исследований.

Согласно работам [3-5] дифференциальные уравнения для моделирования изменения силы трения в трибосистеме на переходных режимах имеет вид:

$$c_2 \ddot{\bar{F}}_{TP} + c_1 \dot{\bar{F}}_{TP} + \bar{F}_{TP} = d_3 \ddot{\bar{\pi}}_t + d_2 \dot{\bar{\pi}}_t + d_1 \bar{\pi}_t, \quad (1)$$

где $c_1 = T_{1F} + T_{2F}$;
 $c_2 = T_{1F} \cdot T_{2F}$;
 $d_1 = K_{1F}(1 - K_{2F} + K_{3F})$;
 $d_2 = K_{1F}(T_{1F} + T_{2F} - K_{2F}T_{2F} + K_{3F}T_{1F})$;
 $d_3 = K_{3F}T_{1F}T_{2F}$;
 K_{1F}, K_{2F}, K_{3F} – коэффициенты усиления;
 T_{1F} и T_{2F} – постоянные времени переходного процесса для силы трения.
 $\dot{\pi}_t$ - относительное отклонение входного воздействия на трибосистему:

$$\dot{\pi}_t = \frac{\dot{\pi}_{t_{\text{тек}}} - \dot{\pi}_{t_{\text{баз}}}}{\dot{\pi}_{t_{\text{баз}}}}, \quad (2)$$

где $\dot{\pi}_{t_{\text{тек}}}$ и $\dot{\pi}_{t_{\text{баз}}}$ - текущее и базовое значения входного воздействия на трибосистему, определяются по формуле:

$$\dot{\pi}_t = \frac{N^{\frac{2}{3}} \times v^{\frac{2}{3}} \times \alpha^{\frac{7}{3}}}{A_{\text{ycp}}^{\frac{1}{3}} \times Q^{\frac{1}{3}} \times K_{\phi}^{\frac{2}{3}}}, \quad (3)$$

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_{ycp} – 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.

За базовое значение выбирают минимально возможную величину для условий моделирования.

На основании анализа представленного дифференциального уравнения (1), а также на основании анализа структурно-динамических схем моделирования скорости износа и силы трения представленных в работах [4, 5] можно определить физический смысл коэффициентов усиления K и постоянных времени T .

1. Коэффициент усиления K_{1F} определяет реакцию трибосистемы на возмущение, т.е. определяют чувствительность трибосистемы. Увеличение коэффициента K_{1F} будет характеризовать начальный заброс силы трения трибосистемы. Поэтому величина коэффициента K_{1F} может выступать критерием оценки чувствительности трибосистемы к внешним возмущениям.

2. Коэффициент усиления K_{2F} определяет значение силы трения трибосистемы на установившемся режиме, т.е. после завершения переходного процесса. Увеличение коэффициентов K_{2F} будет характеризовать уменьшение силы трения. Поэтому величина коэффициента K_{2F} может выступать критерием оценки величины силы трения, по которым можно судить о механических потерях в трибосистемах и производить их ранжирование [2].

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 [2].

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

Результаты исследований

Реакция трибосистемы на входное воздействие, т.е. чувствительность трибосистемы, величина силы трения на установившемся режиме, механические потери за время переходного процесса, а также длительность переходного процесса зависит, как отмечалось в работе [2], от трех объединенных комплексов-факторов:

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

где

- первый комплекс $(\frac{N \times v}{K_{\phi}} = W)$ характеризует условия нагружения

трибосистемы. Физический смысл этого комплекса – мощность подводимая к трибосистеме, геометрическим параметром которого является коэффициент формы, размерность $(\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{м})/\text{с} = \text{Вт} \cdot \text{м}$;

- второй комплекс (α) – характеризует релаксационные свойства структуры обоих сопряженных материалов и их совместимость между собой, размерность $\text{дБ}/\text{м}$;

- третий комплекс $(A_{\text{уср}} \times Q = A_y)$ – 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 $(\text{кг}/\text{с}) \cdot (\text{Дж}/\text{м}^3) = \text{кг}^2/(\text{с}^3 \cdot \text{м})$.

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

$$K_{1F} = f(W, \alpha, A_y); \quad (4)$$

$$K_{2F} = f(W, \alpha, A_y); \quad (5)$$

$$K_{3F} = f(W, \alpha, A_y); \quad (6)$$

$$T_{1F} = f(W, \alpha, A_y); \quad (7)$$

$$T_{2F} = f(W, \alpha, A_y). \quad (8)$$

Алгоритм определения зависимостей (4) – (8) состоит из следующих расчетных операций.

1. Задавшись текущими значениями объединенных комплексов, по величинам которых будет производиться моделирование, определяют:

$$\dot{\pi}_{t_{\text{тек}}} = \frac{N_{\text{тек}}^{2/3} \times V_{\text{тек}}^{2/3} \times \alpha_{\text{тек}}^{7/3}}{(A_{\text{уср.тек}} \times Q_{\text{тек}})^{1/3} \times K_{\phi.\text{тек}}^{2/3}}. \quad (9)$$

2. Задавшись базовими значеннями об'єдинених комплексів, которые незначительно меньше текущих и выбираются произвольно, определяют:

$$\dot{\pi}_{t_{\text{баз}}} = \frac{N_{\text{баз}}^{2/3} \times V_{\text{баз}}^{2/3} \times \alpha_{\text{баз}}^{7/3}}{(A_{\text{уср.баз}} \times Q_{\text{баз}})^{1/3} \times K_{\text{ф.баз}}^{2/3}}. \quad (10)$$

3. Рассчитывают коэффициент K_{1F} , который согласно работы [5] равен:

$$K_{1F} = \frac{(F_0 - F_{\text{тр.баз}})}{F_{\text{тр.баз}}} \times \frac{\dot{\pi}_{t_{\text{баз}}}}{(\dot{\pi}_{t_{\text{мек}}} - \dot{\pi}_{t_{\text{баз}}})}. \quad (11)$$

Нахождение коэффициентов K_{2F} и K_{3F} будем производить из системы двух уравнений, которая приведена в работе [5]:

$$\bar{F}_{\text{тр.уст}} = K_{1F} (1 - K_{2F} + K_{3F}) \times \frac{\dot{\pi}_{t_{\text{баз}}}}{(\dot{\pi}_{t_{\text{мек}}} - \dot{\pi}_{t_{\text{баз}}})}, \quad (12)$$

$$\bar{F}_{\text{max}} = K_{1F} (1 - K_{2F} \times a + K_{3F} \times b) \times \frac{\dot{\pi}_{t_{\text{баз}}}}{(\dot{\pi}_{t_{\text{мек}}} - \dot{\pi}_{t_{\text{баз}}})}, \quad (13)$$

где
$$a = 1 - e^{\left(-\frac{t_{\text{max}}}{T_{1F}}\right)}, \quad (14)$$

$$b = 1 - e^{\left(-\frac{t_{\text{max}}}{T_{2F}}\right)}, \quad (15)$$

где
$$T_{1F} = \frac{t_{\text{np}}}{3}, \quad (16)$$

$$T_{2F} = \frac{t^*}{3}. \quad (17)$$

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

$$\bar{F}_{\text{тр.уст}} = \frac{F_{\text{тр.уст}} - F_{\text{тр.баз}}}{F_{\text{тр.баз}}}; \quad (18)$$

$$\bar{F}_{\text{тр.макс}} = \frac{F_{\text{тр.макс}} - F_{\text{тр.баз}}}{F_{\text{тр.баз}}}. \quad (19)$$

4. Величину коэффициента K_{3F} выразим из уравнения 12, которая с учетом формул (2) и (18) примет вид:

$$K_{3F} = \frac{\bar{F}_{mp.yuc}}{\dot{\pi}_t - K_{1F}} + K_{2F} - 1. \quad (20)$$

5. Подставив формулы (20) в формулу (13), получим значение K_{2F} , которое с учетом формул (19) и (2) примет вид:

$$K_{2F} = \frac{\bar{F}_{mp.max} - b\bar{F}_{тр.yuc} + K_{1F}\dot{\pi}_t(b-1)}{K_{1F}\dot{\pi}_t(b-a)}. \quad (21)$$

Согласно проведенных расчетов были построены следующие зависимости, представленные на рисунках 1 – 5.

Как следует из представленных зависимостей коэффициент усиления K_{1F} , рисунок 1, определяет чувствительность трибосистемы к внешним возмущениям. Поэтому величина коэффициента K_{1F} может выступать критерием оценки чувствительности трибосистемы к внешним воздействиям, характеризуя при этом максимальную величину заброса силы трения.

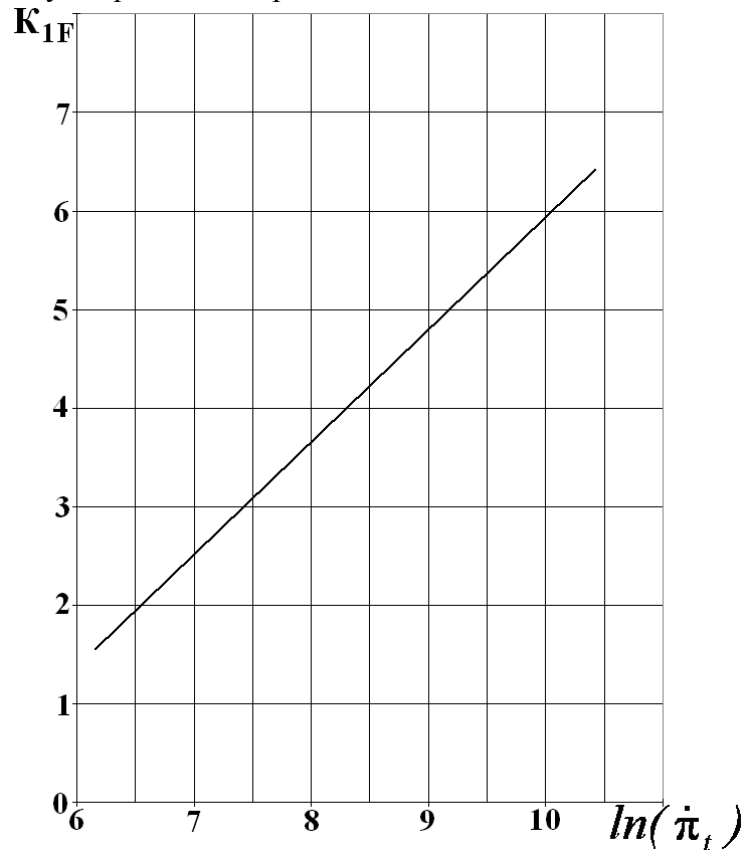


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента усиления K_{1F} от величины входного воздействия $\dot{\pi}_t$

Коэффициент усиления K_{2F} и постоянная времени T_{1F} , рисунки 2 и 3, определяют характер протекания процесса приработки. На зависимостях 2 и 3 отражены оптимальные режимы $\dot{\pi}_{t_{mek}}$, при которых процесс приработки (связанный с формированием оптимальной шероховатости поверхности) будет проходить наиболее эффективно.

Такой подход позволяет на этапе проектирования трибосистем новых машин расчетным путем определить характер изменения коэффициента K_{2F} , а также

постоянной времени T_{1F} во всем эксплуатационном диапазоне и выбрать оптимальные нагрузочно-скоростные режимы (величину входного воздействия), при которых процесс приработки (обкатки) будет наиболее эффективным.

Существенным отличием при моделировании силы трения, по сравнению со скоростью износа [1], 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 рисунках 4 и 5 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.

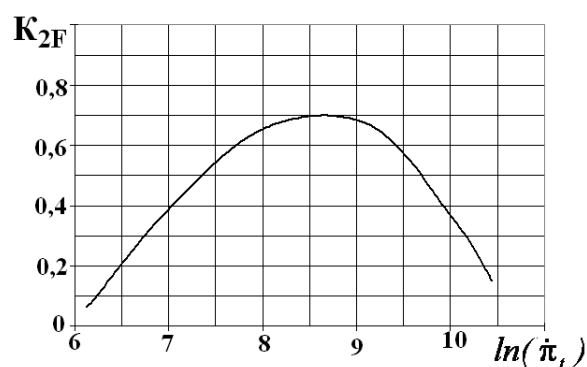


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента усиления K_{2F} от величины входного воздействия $\dot{\pi}_t$

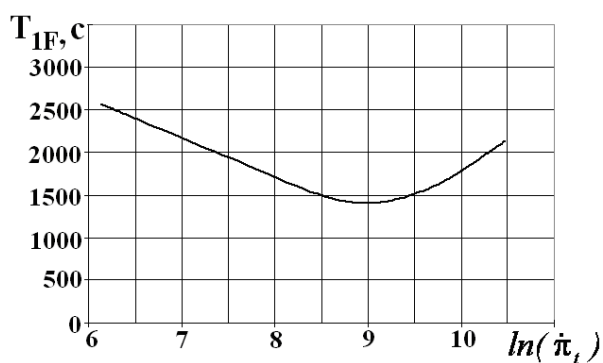


Рисунок 3 – Зависимость постоянной времени T_{1F} от величины входного воздействия $\dot{\pi}_t$

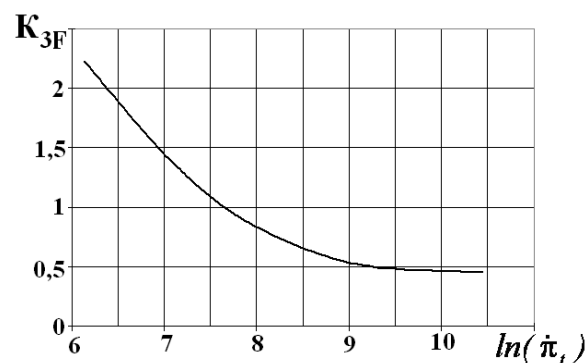


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента усиления K_{3F} от величины входного воздействия $\dot{\pi}_t$

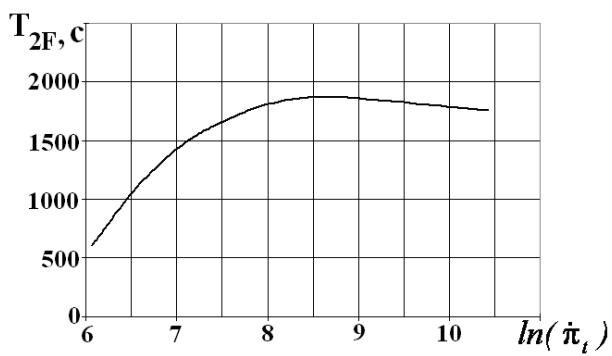


Рисунок 5 – Зависимость постоянной времени T_{2F} от величины входного воздействия $\dot{\pi}_t$

При $K_{3F}=0$ процесс приработки проходит без заброса величины силы трения.

Выводы:

1. Коэффициент усиления K_{1F} определяет реакцию трибосистемы на возмущение, т.е. чувствительность трибосистемы. Чем больше значение коэффициента K_{1F} , тем больше будет заброс 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 малым значением K_{1F} .

2. Коэффициенты усиления K_{2F} , а также постоянная времени T_{1F} имеют явно выраженный оптимум и определяют режимы оптимальной приработки трибосистем. Прирабатывая трибосистему на режимах, соответствующих K_{2opt} и T_{1opt} ,

будут обеспечены минимальные значения силы трения после завершения приработки и минимальное время приработки. Это сократит время обкатки изделия и увеличит его ресурс в процессе дальнейшей эксплуатации.

3. Коэффициент усиления K_{3F} и 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.

Список литературы

1. Войтов В.А., Козырь А.Г. Обоснование и выбор критериев моделирования скорости изнашивания на переходных режимах / Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка – Харків: ХНТУСГ, 2013. – Вип. 136. – С. 247-257.
2. Козырь А.Г. Методика моделирования переходных процессов в трибосистемах машин / Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка – Харків: ХНТУСГ, 2013. – Вип. 134. – С. 139-147.
3. 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.
4. 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.
5. Войтов В.А., Исаков Д.И. Моделирование граничного трения в трибосистемах. III. Методика математического моделирования нестационарных процессов при граничном трении. – Трение и износ, 1996. – Т. 17, №4. – С. 598-605.

V. Vojtov, A. Kozyr

Kharkov National Technical University of Agriculture them. P. Vasilenko

Criteria of modelling the friction force in transient modes

The aim of this study was to substantiate the criteria modeling friction loss in tribosystem and explain their physical meaning.

The criteria for modeling friction losses in the transient regimes in tribosystem were substantiated in the work. Criteria are obtained in the form of the coefficients in the differential equations that describe the transition process. The basis of such criteria is time constants and amplification factors that have some physical meaning and the response of tribosystem to various disturbances was shown.

Optimal range of operation will tribosystems ranges with small K_{1F} . Increase K_{3F} reduces T_{2F} and characterizes the mechanical losses in tribosystem during running.

tribosystem, the friction force, transition process, gain coefficients, time constants

Получено 18.04.13