

## ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР КРИТЕРИЕВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ НА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

**Войтов В.А., д.т.н., проф., Козырь А.Г., аспирант**

*(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
им. П. Василенко)*

*В работе обоснованы критерии оценки переходных процессов в трибосистемах и дан анализ их степени влияния на этот процесс. Такие 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.*

**Актуальность.** На этапе проектирования новых машин большой интерес представляют задачи по определению скорости изнашивания и потерь на трение входящих в конструкцию трибосистем, как на установившихся режимах, т.е. после завершения приработки, так и во время приработки. Автором работ [1, 2] отмечалось, что износ за время приработки может превышать износ за все оставшееся время эксплуатации. Поэтому моделирование процессов изнашивания на переходных режимах (во время приработки) позволит более точно выполнить расчеты по ресурсу трибосистем и выбрать оптимальную конструкцию агрегата в целом.

**Целью данной работы** явилось обосновать и выбрать критерии, которые характеризуют переходный процесс в трибосистемах, с помощью которых можно выполнить оптимизацию конструкции на этапе проектирования.

**Методический подход в проведении исследований.**



условий моделирования.

Для моделирования переходного процесса силы трения:

$$c_2 \ddot{F}_{TP} + c_1 \dot{F}_{TP} + \bar{F}_{TP} = d_3 \ddot{\pi}_t + d_2 \dot{\pi}_t + d_1 \pi_t, \quad (4)$$

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.

На основании анализа представленных дифференциальных уравнений (1) и (4), 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. 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 износа 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 износа и силы трения трибосистемы на установившемся режиме, т.е. после завершения переходного процесса. Увеличение коэффициентов  $K_2$  будет характеризовать уменьшение скорости износа и силы трения. Поэтому величины коэффициентов  $K_{2I}$  и  $K_{2F}$  могут выступать критериями оценки величин скорости износа 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  $T_{1L}$ ,  $T_{1F}$  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, величины скорости износа и силы трения на установившемся режиме, механические потери за время переходного процесса, а также длительность переходного процесса зависит от трех объединенных комплексных факторов:

$$\frac{NW}{K_{\delta}} = W; \quad \alpha; \quad A_{yep} \cdot Q = A_y,$$

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

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

- второй комплекс ( $\alpha$ ) – характеризует релаксационные свойства структуры обоих сопряженных материалов и их совместимость между собой, размерность dB/м;

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

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

$$K_{1I} = f(W, \alpha, A_y); \quad (5)$$

$$K_{2I} = f(W, \alpha, A_y); \quad (6)$$

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

Алгоритм определения зависимостей (5), (6), (7) состоит из следующих расчетных операций.

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

$$\dot{\pi}_{t \text{òàê}} = \frac{N_{\text{òàê}}^{2/3} \times V_{\text{òàê}}^{2/3} \times \alpha_{\text{òàê}}^{7/3}}{(A_{\text{òñð.òàê}} \times Q_{\text{òàê}})^{1/3} \times \hat{E}_{\text{ò.òàê}}^{2/3}}. \quad (8)$$

2. Задавшись базовыми значениями объединенных комплексов, которые незначительно меньше текущих и выбираются произвольно, определяют:

$$\dot{\pi}_{t \text{áàç}} = \frac{N_{\text{áàç}}^{2/3} \times V_{\text{áàç}}^{2/3} \times \alpha_{\text{áàç}}^{7/3}}{(A_{\text{òñð.áàç}} \times Q_{\text{áàç}})^{1/3} \times \hat{E}_{\text{ò.áàç}}^{2/3}}. \quad (9)$$

3. Рассчитывают коэффициент  $K_{1I}$ , который согласно работы [5] определяют:

$$K_{1I} = \frac{(I_{V \text{max}} - I_{V \text{áàç}})}{I_{V \text{áàç}}} \times \frac{\dot{\pi}_{t \text{áàç}}}{(\dot{\pi}_{t \text{òàê}} - \dot{\pi}_{t \text{áàç}})}. \quad (10)$$

4. Рассчитывают коэффициент  $K_{2I}$ , который согласно работы [5] определяют:

$$K_{2I} = \frac{(I_{V \text{max}} - I_{V \text{òñð}})}{(I_{V \text{max}} - I_{V \text{áàç}})} \times \frac{\dot{\pi}_{t \text{áàç}}}{(\dot{\pi}_{t \text{òàê}} - \dot{\pi}_{t \text{áàç}})}. \quad (11)$$

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

$$T_{II} = \frac{t_{i\delta}}{3}. \quad (4.12)$$

Согласно проведенных расчетов были построены следующие зависимости, представленные на рисунках 1, 2, и 3. Зависимости  $K_{II}$ ,  $K_{2I}$  и  $T_{II}$  от параметра входного воздействия удобнее отображать в логарифмических координатах,  $\ln(\dot{\pi}_t)$ .

Как следует из представленных зависимостей коэффициент усиления  $K_{II}$ , рисунок 1, однозначно определяет чувствительность трибосистемы к возмущениям. Чем больше величина входного возмущения (согласно формулы (8) это может быть: увеличением нагрузки, скорости скольжения, совместимости материалов или уменьшение смазывающих свойств рабочей среды, ее расхода через узел трения и уменьшение коэффициента формы), тем больше будет величина заброса скорости износа в начальный период работы трибосистемы. При определенной величине входного воздействия  $\dot{\pi}_t$  наступит повреждаемость, т.е. выход из строя трибосистемы. Поэтому большая величина  $K_{II}$  в эксплуатации не дает большого ресурса для трибосистемы. Необходимо на этапе проектирования трибосистем стремиться к снижению значений  $K_{II}$ . Для этого необходимо, как следует из формулы (10), 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  $\dot{\pi}_t$ .

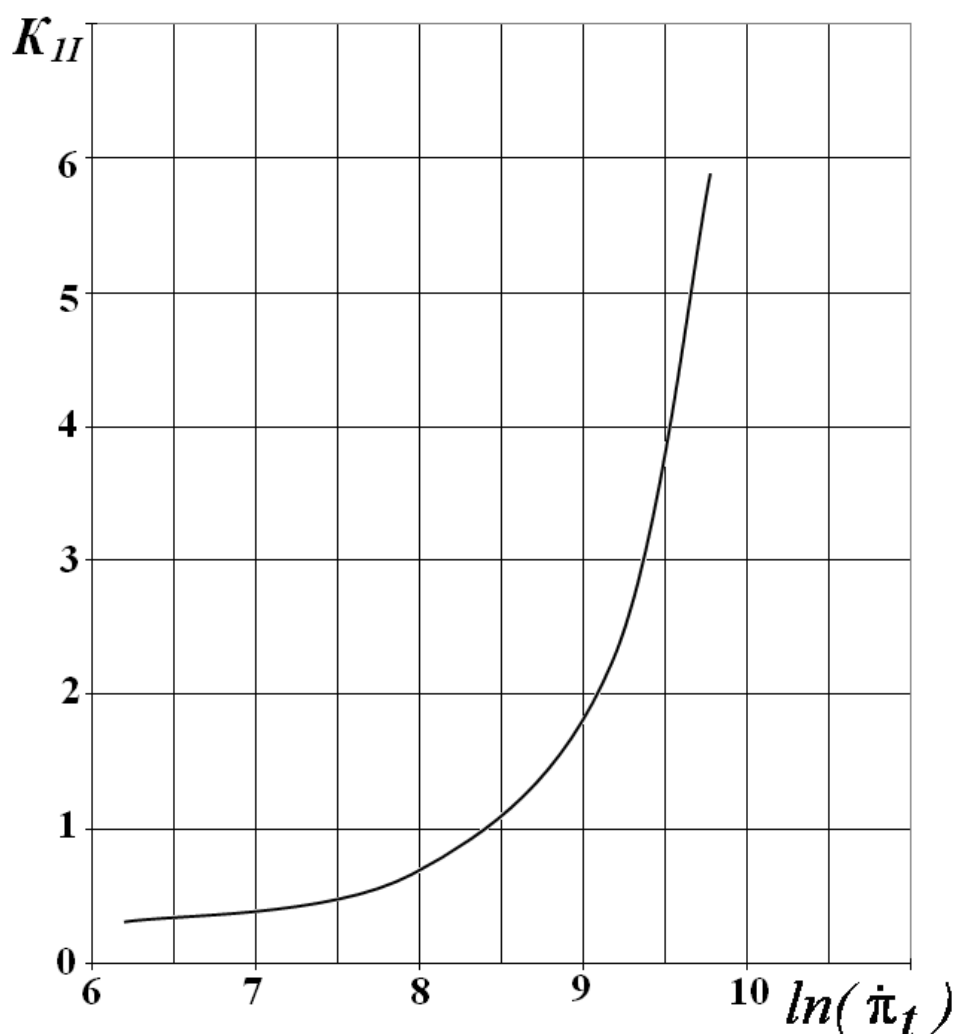


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента усиления  $K_{II}$  от величины входного воздействия  $\dot{\pi}_t$

Коэффициент усиления  $K_{2I}$ , рисунок 2, определяет значение величины скорости износа после завершения приработки. Как следует из зависимости, представленной на рисунке 2, существует оптимальное значение величины входного воздействия  $\dot{\pi}_t$ , при котором процесс приработки будет оптимальным, т.е. величина скорости износа после завершения процесса будет минимальной и время для завершения процесса тоже будет минимальным, рисунок 3. Поэтому на этапе проектирования трибосистем необходимо стремиться к оптимальным значениям  $K_{2I}$  и  $T_{II}$ . Изменять эти коэффициенты, как следует из формул (11, 12), можно с помощью параметра  $\dot{\pi}_t$ , формула (8), а, следовательно: материалами, смазочной средой, геометрией узла, нагрузкой,

скоростью скольжения. По оптимальному значению  $\dot{\pi}_t$ , которое определяется после моделирования, можно определить  $\dot{\pi}_{t\text{opt}}$ , для проведения процесса приработки трибосистемы. Эта величина на графиках 2 и 3 имеет оптимумам.

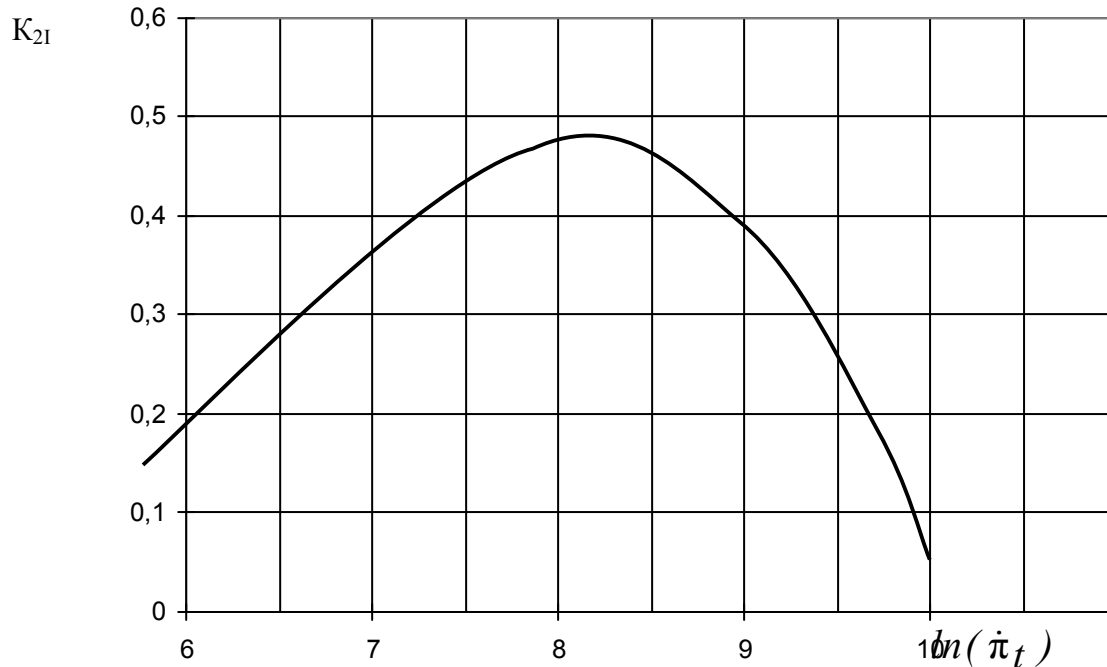


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента усиления  $K_{2I}$  от величины входного воздействия  $\dot{\pi}_t$

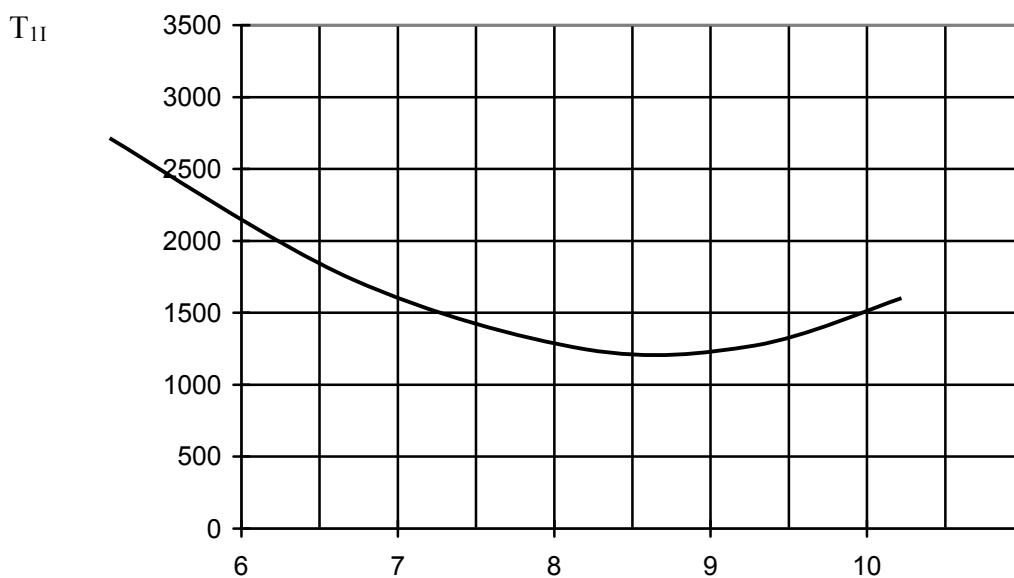


Рисунок 3 – Зависимость постоянной времени  $T_{II}$  от величины входного воздействия  $\dot{\pi}_t$



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 износа после завершения приработки (малые значения  $K_{2I}$ ) и длительностью процесса приработки (большие значения  $T_{II}$ ). 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  $K_{II}$ ,  $K_{2I}$  и  $T_{II}$ , на этапе проектирования трибосистем, позволит конструктору выбрать оптимальные режимы их обкатки (приработки), по значениям оптимумов  $K_{2I}$  и  $T_{II}$ , и оптимальные режимы эксплуатации, повышение которых нежелательно, по значениям коэффициента  $K_{II}$ .

#### **Выводы:**

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

2. Коэффициент усиления  $K_{II}$  определяет реакцию трибосистемы на возмущение, т.е. чувствительность трибосистемы. Чем больше значение коэффициента  $K_I$ , тем больше будет заброс скорости износа 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  $K_I$ .

3. Коэффициент усиления  $K_{2I}$ , а также постоянная времени  $T_{II}$  имеют явно выраженный оптимум и определяют режимы оптимальной приработки трибосистем. Прирабатывая трибосистему на режимах, соответствующих  $K_{2opt}$  и  $T_{Iopt}$ , будут обеспечены минимальные значения скорости износа после завершения приработки и минимальное время приработки. Это сократит время

обкатки изделия и увеличит его ресурс в процессе дальнейшей эксплуатации.

### **Список литературы**

1. Карасик И.И. Развитие критериев и методов экспериментальной оценки прирабатываемости материалов. – Вестник машиностроения, 1984, №11. – С. 16-19.

2. Карасик И.И. Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. – М. : Наука, 1979. – 136 с.

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.

### **Анотація**

## **ОБҐРУНТУВАННЯ І ВИБІР КРИТЕРІЇВ МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЗНОШУВАННЯ НА ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ**

Войтов В.А., д.т.н., проф., Козир А.Г., аспірант

*В роботі обґрунтовано критерії оцінки перехідних процесів в трибосистемах та дано аналіз їх ступеня впливу на цей процес. Такі критерії отримані у вигляді коефіцієнтів, що входять до диференційних рівнянь, що*

*описують перехідний процес. Показано, що основу таких критеріїв складають постійні часу і коефіцієнти підсилення, які мають певний фізичний зміст і характеризують реакцію трібосистеми на різні збурювання.*

## **Abstract**

### **RATIONALE AND SELECTION CRITERIA FOR SIMULATION THE RATE OF WEAR IN THE TRANSITION MODE**

**Vojtov V.A., Kozyr A.G.,**

*Evaluation criteria transient processes in tribosystem and an analysis of the degree of influence on this process were substantiated in the work. These 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.*