

## МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРИБОСИСТЕМАХ МАШИН

**Козырь А.Г., аспирант**

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

*В работе изложена методика моделирования переходных процессов в трибосистемах. Обоснованы независимые факторы, определяющие входное воздействие на трибосистему. Функциональные зависимости максимальных и минимальных значений параметров переходного процесса в трибосистемах получены в виде регрессионных зависимостей.*

**Актуальность.** На этапе проектирования новой техники перед конструктором стоит задача по оценке ресурса всех трибосистем, которые входят в конструкцию. Для оценки ресурса необходимо знать износ за приработку и износ на установившемся режиме эксплуатации. В таких случаях эффективным является применение математического моделирования. Исследование математических моделей позволит выявить новые закономерности и провести оптимизацию параметров узлов трения и машины в целом по различным критериям. Такой результат исследований чрезвычайно важен для практических целей и дает опытно-конструкторскую проработку задачи.

В связи с вышеизложенным целью исследований является разработка методического подхода математического моделирования переходных процессов при граничной смазке, который позволит с помощью компьютерных программ производить исследование триботехнических характеристик различных трибосистем с последующей их оптимизацией, а также определить ресурс с учетом износа за приработку или обкатку.

**Определение параметров переходного процесса и факторов определяющих входное воздействие.** Из анализа работ [1-3] следует вывод, что переходные процессы в трибосистемах, в зависимости от величины входного воздействия на трибосистему, имеют различный вид переходной характеристики, а, следовательно, и различные параметры, характеризующие этот процесс, которые представлены на рис. 1.

В качестве параметров, характеризующих переходный процесс в трибосистеме, как следует из рис. 1, можно выделить следующие:

- максимальное значение скорости износа во время переходного процесса  $\bar{I}_{Vmax}$  и установившееся значение скорости износа  $\bar{I}_V$  после завершения переходного процесса;

- величина начального заброса силы трения  $\bar{F}_0$  при приложении входного воздействия к трибосистеме;

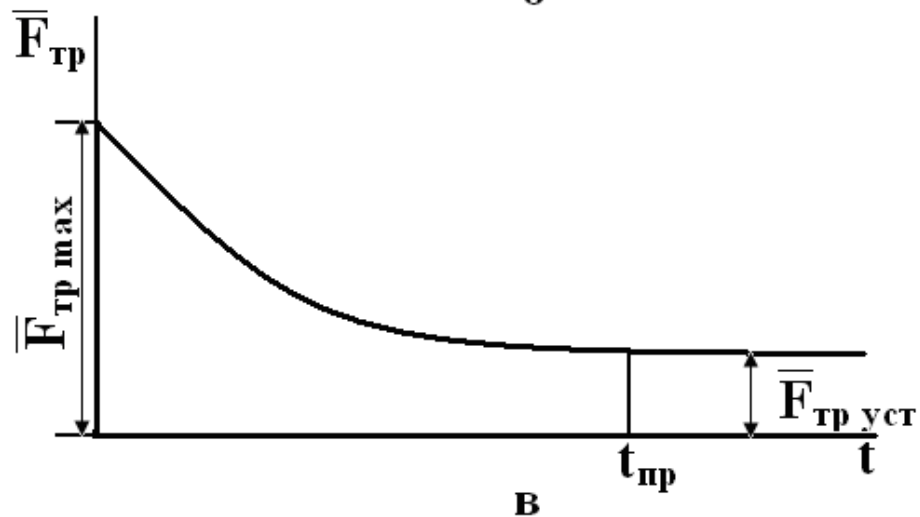
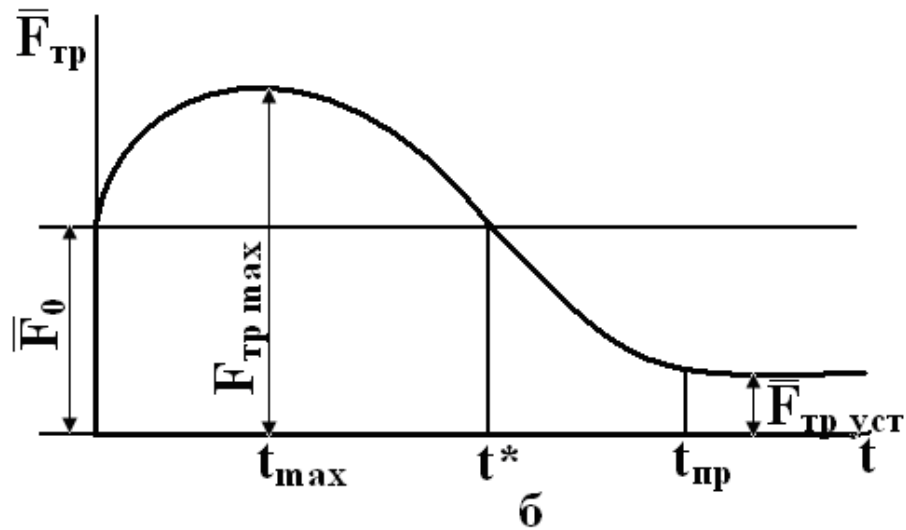
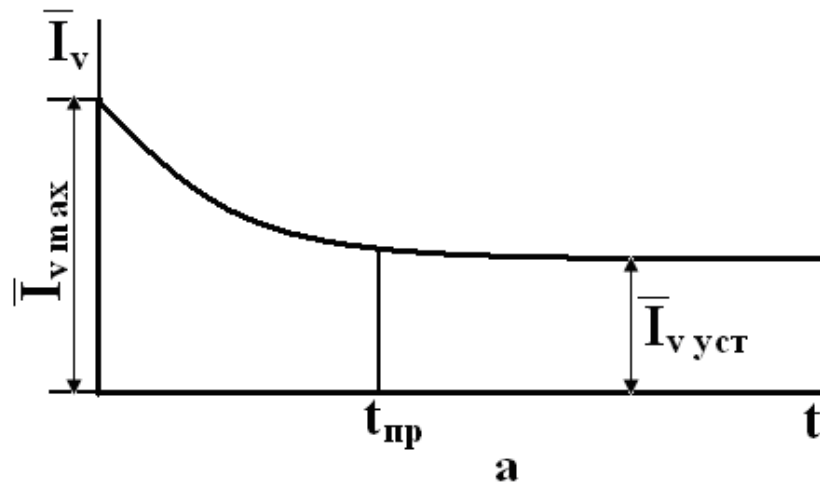


Рисунок 1 – Зависимость изменения скорости объемного износа и силы трения по времени (переходная характеристика): а – скорости объемного износа; б – силы трения; в – частный случай изменения силы трения

- максимальное значение силы трения во время переходного процесса  $\bar{F}_{\text{тр}\max}$  и установившееся значение силы трения  $\bar{F}_{\text{тр}\text{уст}}$  после завершения переходного процесса;
- время завершения переходного процесса  $t_{\text{пр}}$ , время, когда сила трения

достигает максимального значения  $t_{\max}$  и время  $t^*$ , когда производная функции  $F_{mp}(t)$  меняет свой знак.

Как указано в работе [3] при линеаризации дифференциальных уравнений применяются относительные отклонения величин, которые обозначаются чертой сверху. В данном случае:

$$\bar{I}_v = \frac{I_{v \text{ тек}} - I_{v \text{ баз}}}{I_{v \text{ баз}}}$$

$$\bar{F}_{mp} = \frac{F_{mp \text{ тек}} - F_{mp \text{ баз}}}{F_{mp \text{ баз}}},$$

где  $I_{v \text{ тек}}$  и  $F_{mp \text{ тек}}$  – текущее значение параметра во время переходного процесса;

$I_{v \text{ баз}}$  и  $F_{mp \text{ баз}}$  – базовое значение параметра, за которое выбирают минимальные значения скорости износа и силы трения на установившемся режиме.

В качестве входного воздействия на трибосистему в работах [1-3] выбрана величина производной от критерия времени  $\dot{\pi}_t$ , которая не зависит от времени и формирует ступенчатое входное воздействие на систему:

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

где  $N$  – нагрузка на узле трения, Н;

$v$  – скорость скольжения, м/с;

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

$A_{y \text{ ср}}$  – параметр, характеризующий смазывающие свойства среды, Дж/м<sup>3</sup>;

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

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

Методики определения параметров  $\alpha$ ,  $A_{y \text{ ср}}$ ,  $K_{\phi}$  изложены в работах [1-3].

При планировании и проведении многофакторного эксперимента с целью сокращения числа факторов, а также с учетом рекомендаций работы [3], перечисленные выше параметры можно объединить в три комплекса:

- 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 (Н·м·м)/с = Вт·м;

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

- третий комплекс ( $A_{ycp} \times Q = A_y$ ) – 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 кг<sup>2</sup>/(с<sup>3</sup>·м).

С учетом вышеизложенного отметим, что независимыми факторами, формирующими входное воздействие на трибосистему, будут выступать три комплекса: ( $\frac{N \times v}{K_\phi} = W$ ), ( $\alpha$ ), ( $A_{ycp} \times Q = A_y$ ).

Функциями отклика будут выступать параметры:  $I_v$  оїò,  $I_{vmax}$ ,  $F_0$ ,  $F_{mpmax}$ ,  $F_{mpycm}$ ,  $t_{np}$ ,  $t_{max}$ ,  $t^*$ .

**Планирование эксперимента и результаты экспериментальных исследований.** Математическое описание зависимостей параметров:  $I_v$  оїò,

$I_{vmax}$ ,  $F_0$ ,  $F_{mpmax}$ ,  $F_{mpycm}$ ,  $t_{np}$ ,  $t_{max}$ ,  $t^*$  от исследуемых факторов ( $\frac{N \times v}{K_\phi} = W$ ),

( $\alpha$ ), ( $A_{ycp} \times Q = A_y$ ) представляется в виде количественных соотношений, связывающих текущие значения выходной функции с контролируемыми переменными. Информационной основой для получения математического описания являются статистические данные, полученные в результате специально организованного эксперимента.

Для выбранного числа факторов – 3 и уровней варьирования – 5 сгенерирован D-оптимальный план с эффективностью 99%, включающий 25 опытов.

План-матрица охватывает большое многообразие сочетаний материалов в реальных узлах трения, например таких как: сталь по стали  $\alpha = 0,3 \times 10^3$  дВ/м; чугун по чугуну  $\alpha = 0,5 \times 10^3$  дВ/м; сталь по чугуну  $\alpha = 1 \times 10^3$  дВ/м; чугун по бронзе  $\alpha = 0,7 \times 10^3$  дВ/м; сталь по бронзе  $\alpha = 1,3 \times 10^3$  дВ/м; которые определялись фактором  $\alpha$ , дВ/м.

Испытания проводились на трех кинематических схемах: «диск – диск»,  $K_\phi = 0,50$  л/м; «диск – колодка»,  $K_\phi = 1,52$  л/м; «кольцо-кольцо»,  $K_\phi = 8,18$  л/м и  $K_\phi = 16,3$  л/м, т.е. производилось применение высших и низших кинематических схем контакта. Условия эксперимента: нагрузка на узле трения  $N = 364; 480; 730; 980$  Н; скорость скольжения  $v = 0,5$  м/с. Перечисленные сочетания параметров определены фактором  $\frac{N \times v}{K_\phi} = W$ , Вт·м.

В качестве рабочей (смазочной) среды применялись следующие жидкости: авиационный керосин: ТС – 1; гидравлическая жидкость АМГ – 10; масло ВНИИНП 403, которые подавались в зону трения с различным расходом.

Перечисленные параметры определены фактором  $A_{ycp} \times Q$ , который изменялся в пределах от  $0,48 \times 10^{13}$  до  $7,2 \times 10^{13}$  кг<sup>2</sup>/(с<sup>3</sup>·м).

В процессе проведения эксперимента методом искусственных баз определяли линейный износ каждого из элементов, который пересчитывали в объемную скорость износа на установившемся режиме,  $I_{v\text{уст}}$ . Максимальное значение скорости износа  $I_{v\text{max}}$  во время переходного процесса определялось с помощью метода акустической эмиссии.

Значения сил трения во время переходного процесса  $F_0$  и  $F_{mp\text{max}}$  и на установившемся режиме  $F_{mp\text{уст}}$  определялось с помощью контрольного самопишущего прибора машины трения, который перед началом экспериментов тарировался.

Значение времени окончания переходного процесса  $t_{np}$ , а также значений времени  $t_{\text{max}}$  и  $t^*$  характеризующих переходный процесс, определяли по характеру протекания во времени трех величин: момента трения; дисперсии амплитуд сигналов АЭ и температуры неподвижного элемента узла трения.

Были получены регрессионные зависимости третьего порядка, которые в общем виде можно записать:

$$\Phi = \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}}, \alpha, A_{ycp} \times Q \right).$$

В качестве примера приведены регрессионные уравнения определения максимального значения силы трения в процессе приработки  $F_{\text{max}}$  и максимального значения скорости изнашивания  $I_{v\text{max}}$ :

$$\begin{aligned} F_{\text{max}} = & 1171,13 - 10,34 \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right) - 1,87\alpha - 0,11 \times 10^{-10} (A_{ycp} \times Q) + 0,004 \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right) \times \alpha - \\ & - 0,135 \times 10^{-13} (A_{ycp} \times Q) - 0,13 \times 10^{-13} \alpha \times (A_{ycp} \times Q) + 0,039 \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right)^2 + \\ & + 0,0017\alpha^2 + 0,7 \times 10^{-24} (A_{ycp} \times Q)^2 - 0,44 \times 10^{-4} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right)^3 - \\ & - 0,46 \times 10^{-5} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right)^2 \times \alpha - 0,188 \times 10^{-16} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right)^2 \times (A_{ycp} \times Q) - \\ & - 0,1 \times 10^{-16} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right) \times \alpha \times (A_{ycp} \times Q) + 0,36 \times 10^{-27} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right) \times (A_{ycp} \times Q)^2 - \\ & - 0,53 \times 10^{-6} \alpha^3 - 0,74 \times 10^{-17} \alpha^2 \times (A_{ycp} \times Q) + 0,3 \times 10^{-27} \alpha \times (A_{ycp} \times Q)^2 - \\ & - 0,83 \times 10^{-38} (A_{ycp} \times Q)^3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{v \max} = & 25271,04 - 141,77 \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right) - 44,38 \alpha - 0,77 \times 10^{-9} (A_{\text{ycp}} \times Q) + \\
& + 0,09 \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right) \times \alpha - 0,15 \times 10^{-12} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right) \times (A_{\text{ycp}} \times Q) - 0,136 \times 10^{-12} \alpha \times \\
& \times (A_{\text{ycp}} \times Q) + 0,41 \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right)^2 + 0,0036 \alpha^2 + 0,31 \times 10^{-22} (A_{\text{ycp}} \times Q)^2 - \\
& - 0,425 \times 10^{-3} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right)^3 - 0,6 \times 10^{-4} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right)^2 \times \alpha - 0,13 \times 10^{-15} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right)^2 \times \\
& \times (A_{\text{ycp}} \times Q) - 0,75 \times 10^{-15} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right) \times \alpha \times (A_{\text{ycp}} \times Q) + 0,322 \times 10^{-26} \left( \frac{N \times v}{K_{\phi}} \right) \times \\
& \times (A_{\text{ycp}} \times Q)^2 - 0,998 \times 10^{-5} \alpha^3 + 0,12 \times 10^{-16} \alpha^2 \times (A_{\text{ycp}} \times Q) + 0,3 \times 10^{-27} \alpha \times \\
& \times (A_{\text{ycp}} \times Q)^2 - 0,268 \times 10^{-36} (A_{\text{ycp}} \times Q)^3.
\end{aligned}$$

Графическая интерпретация зависимостей максимального значения силы трения в процессе приработки представлена на рис. 2, на установившемся режиме (после завершения приработки) – на рис. 3.

Соответственно, для максимального значения скорости изнашивания (в процессе приработки) на рис. 4, на установившемся режиме, рис. 5.

Полученные зависимости позволяют определить параметры переходного процесса, которые являются коэффициентами дифференциальных уравнений [2-3], а, следовательно, выполнить моделирование переходных процессов в трибосистемах на этапе проектирования.

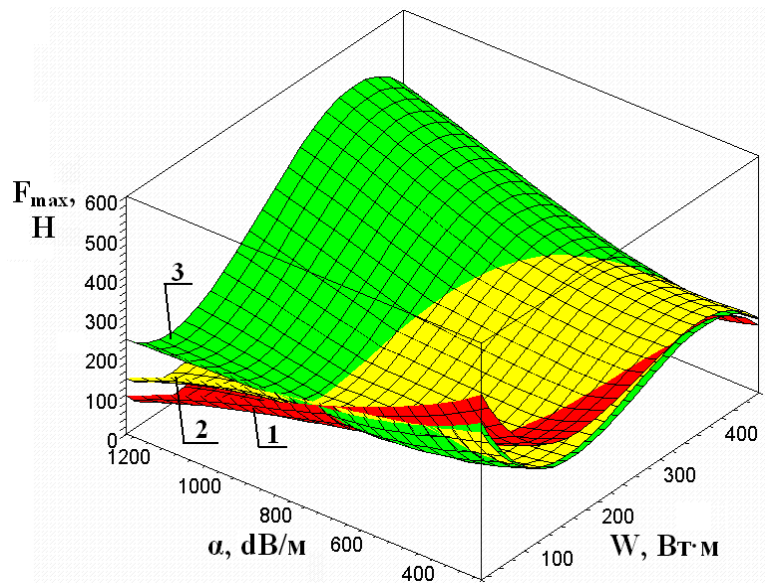


Рисунок 2 – Зависимости максимального значения силы трения в процессе приработки: 1 – гидравлическое масло ВНИИНП 403; 2 – гидравлическое масло АМГ-10; 3 – керосин ТС-1.

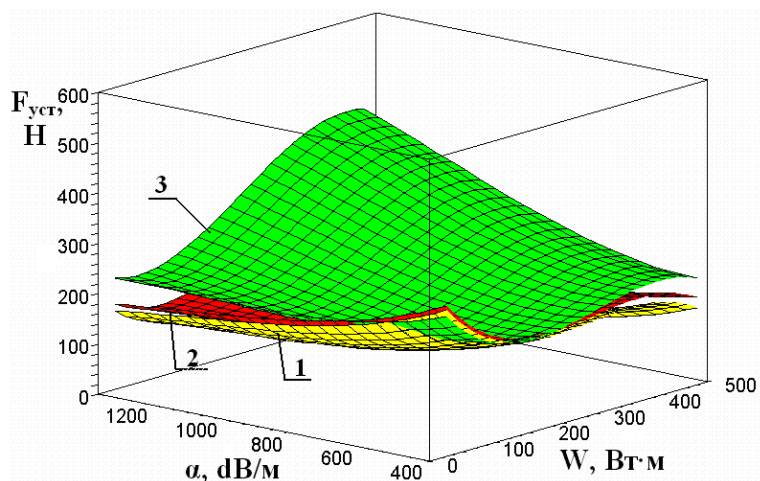


Рисунок 3 – Зависимость установившегося значения силы трения (после завершения приработки): 1 – гидравлическое масло ВНИИНП 403; 2 – гидравлическое масло АМГ-10; 3 – керосин ТС-1.

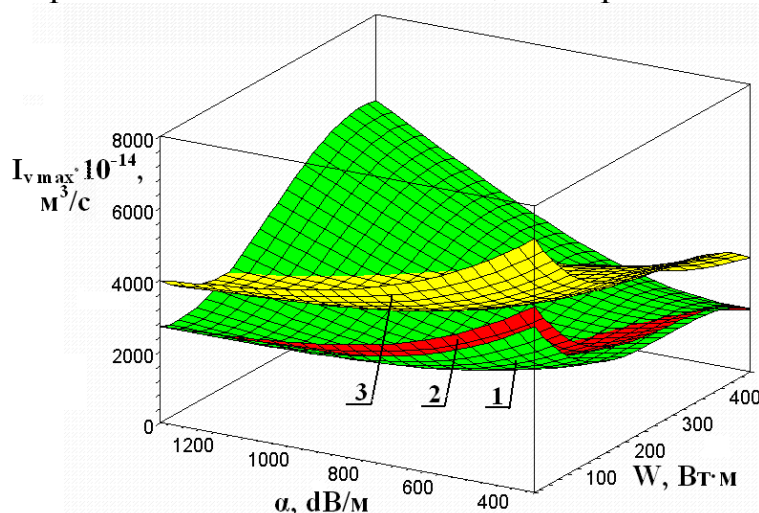


Рисунок 4 – Зависимость максимального значения скорости изнашивания во время приработки: 1 – гидравлическое масло ВНИИНП 403; 2 – гидравлическое масло АМГ-10; 3 – керосин ТС-1.

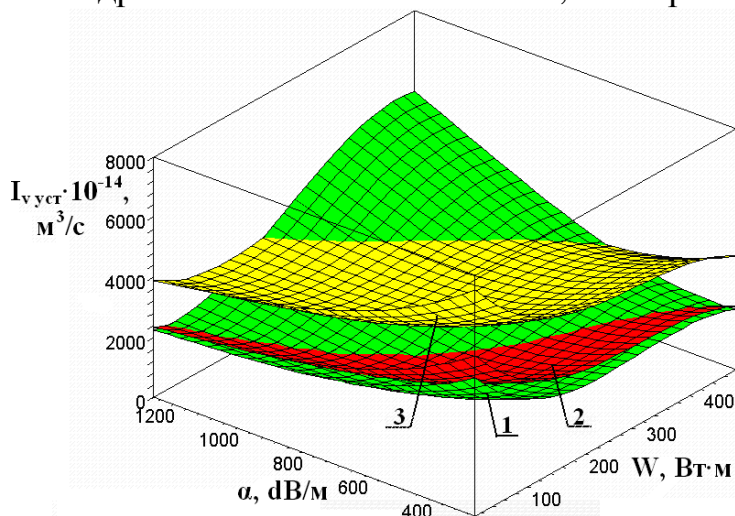


Рисунок 5 – Зависимость установившегося значения скорости изнашивания (после завершения приработки): 1 – гидравлическое масло ВНИИНП 403; 2 – гидравлическое масло АМГ-10; 3 – керосин ТС-1.

## **Выводы**

В результате проведенных исследований определены и обоснованы независимые факторы, определяющие входное воздействие на трибосистему. Функциональные зависимости максимальных и минимальных значений параметров переходного процесса в трибосистемах определены в виде регрессионных зависимостей, которые получены на основе теории планирования эксперимента.

## **Список литературы**

1. 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.
2. 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.
3. 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**

### **МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ТРИБОСИСТЕМАХ МАШИН**

**Козир А.Г., аспірант**

*В роботі викладена методика моделювання перехідних процесів в трибосистемах. Обґрунтовані незалежні фактори, що визначають вхідний вплив на трибосистему. Функціональні залежності максимальних і мінімальних значень параметрів перехідного процесу в трибосистемах отримані у вигляді регресійних залежностей.*

## **Abstract**

### **METHODS MODELING OF TRANSIENTS IN TRIBOSYSTEM MACHINES**

**A. Kozyr**

*Methods of modeling of transient processes in the tribosystems were presented in the work. Independent determinants of input effect on tribosystems were substantiated. Functional dependencies maximum and minimum values of the parameters of the transition process in tribosystem obtained as a regression .*