ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտութ. սերիա XXVI, № 5, 1973 Серия технических наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ

А. К. ПОГОСЯН, М. Г. СТАКЯН

О ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ

Известно [1—3], что выбор режима модельных испытаний на трение по критериальным соотношениям позволяет получить хорошее совпадение результатов испытаний на модельных образцах с результатами натуральных испытаний различных тормозов и муфт. При этом имеет существенное значение соблюдение условия равенства коэффициента взаимного перекрытия между модельным и натурным образцами $K_{вз}' = K_{вз}$.

Для получения масштабных коэффициентов перехода от натуры к модели режимных параметров процесса внешнего трения использовались методика нахождения критериев подобия на базе π-теоремы анализа размерностей [4] и методика решения системы уравнений (на ЭЦВМ), описывающая процесс трения с получением масштабных коэффициентов [3]. Погрешность в определении критериев подобия, повторность опытов и систематические погрешности измерений, влияющие на точность моделирования трения, оцениваются в работе [5].

В связи с неизбежным рассеянием экспериментальных данных при определении характеристик трения, точность моделирования должна рассматриваться также в вероятностном аспекте. В первом приближении принято, что рассеяние значений коэффициента трения f и температуры на поверхности трения ϑ подчиняются нормальному закону распределения и существует корреляционная зависимость между f, ϑ и продолжительностью общего рабочего цикла τ. Подобно [6, 7], семейство линейных корреляционных уравнений с учетом наличия регрессии Y на X представляется в виде:

$$Y_x=(\bar{b}_{yx}\pm KS_{b_y})(X-\bar{X})+(\bar{Y}\pm KS_{yr}), \qquad (1)$$

где

$$\bar{b}_{y/x}=r\frac{\sigma_y}{\sigma_x}; \qquad S_{b_y}=\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\sqrt{\frac{1-r^2}{n}}; \qquad S_{yr}=\sigma_y\sqrt{1-r^2}.$$

Учитывая характер распределения опытных данных для каждого параметра, подобно [8], уточнены виды зависимостей $f=\varphi_1(\tau)$ и $\vartheta=\varphi_2(\tau)$.

Зависимость $f=\varphi_1(\tau)$ дает наибольшее приближение с прямой линией в полулогарифмических координатах $\lg f - \tau$. При разных значениях величины τ дисперсия коэффициента трения практически остается постоянной, а с увеличением достоверности $l(f)$ при фиксированном τ значения f уменьшаются. С учетом характера зависимости $f=\varphi_1(\tau)$ в координатах $\lg f - \tau$ корреляционное уравнение (1) примет вид:

$$\lg f_\tau = -|\overline{b}_f|(\tau-\overline{\tau}) + (\lg \overline{f} + KS_{f_\tau}). \qquad (2)$$

Аналогично найдено, что зависимость $\theta=\varphi_2(\tau)$ является прямой линией в логарифмических координатах $\lg\theta - \lg\tau$. В этом случае, с увеличением τ наблюдается уменьшение дисперсии θ, а с увеличением достоверности $l(\theta)$—рост значений θ. Поэтому зависимость (1) принимает вид:

$$\lg\theta_\tau = (\overline{b}_{\lg\theta} + KS_{b_\theta})(\lg\tau - \lg\overline{\tau}) + (\lg\overline{\theta} - KS_{\theta_\tau}). \qquad (3)$$

Рассматривается вопрос о возможности лабораторных исследований процесса трения в колодочных тормозах при повторно-кратковременном режиме работы на серийной машине трения ИМ-58 с рабочим узлом трения, геометрически не подобным натурному объекту.

В качестве натурного объекта был использован колодочный тормоз типа ТКТГ-300М (с электрогидравлическим толкателем) механизма передвижения мульдомагнитного крана грузоподъемностью 15/5 т, установленный на лабораторном инерционном тормозном стенде.

В качестве модельного объекта служили кольцевые дисковые образцы (трение торцами) лабораторной машины трения ИМ-58. Испытывалась фрикционная пара: вальцовочная лента 6КВ-10+сталь 15 с $K_{тр}=0{,}4$ на натуре и $K_{тр}=0{,}4$; 0,8 на модели.

По разработанной методике [2], на основании теории подобия и анализа размерностей, в соответствии с геометрией натурного и модельного объектов, а также режимом работы натурного тормоза ТКТГ-300М, произведен выбор режима модельных испытаний на машине ИМ-58. Это позволило осуществить моделирование процесса трения натурного объекта на лабораторных образцах с достаточной высокой степенью точности [2].

Экспериментальные данные обработаны на ЭЦВМ и в таблицах 1 и 2 приведены статистические параметры данных испытаний. По данным этих таблиц рассчитаны уравнения семейства кривых (2) и (3) для натурных и модельных испытаний при $K_{тр}=K_{тр}=0{,}4$ и $K_{тр}=0{,}8\cdot K_{тр}$, удовлетворяющих достоверностям $l(f)$, $l(\theta)$, равным 10, 50 и 90 % (таблицы 3 и 4).

Как видно, для зависимости $\lg f - \tau$ область рассеяния коэффициента трения f для модельных образцов несколько больше, чем для натурных. По всему интервалу τ средневеротностные значения f на натуре превышают аналогичные величины на модели.

Для оценки точности моделирования целесообразно совмещение полей рассеяния f на модели и на натуре. При одинаковых значениях $K'_{вз}=0{,}4$ рассматриваемые области рассеяния взаимно перекрываются в большей степени, чем при $K''_{вз}=0{,}8=K_{вл}$. Средневероятностные зна-

Таблица 1

Объект испытаний	n	$s_{\lg f}$	$\sigma_{\lg f}$	r	$\overline{\lg}$	$\overline{\lg f}$	$\overline{\lg f_{0.5}}$	$S_{\lg f}$
Натура $K_{вз}=0{,}4$	39	0,1115	0,2659	−0,7927	0,3613	−0,3763	−0,3323	0,0673
Модель $K_{вз}'=0{,}4$	30	0,1520	0,3200	−0,7855	0,4541	−0,4747	−0,3720	0,0940
Модель $K_{вз}'=0{,}8$	30	0,1057	0,2977	−0,6543	0,5583	−0,6290	−0,2319	0,0798

Таблица 2

Объект испытаний	n	$s_{\lg\sigma}$	$\sigma_{\lg\sigma}$	r	$\overline{\lg\sigma}$	$\overline{\lg\sigma_0}$	$b_{0.5}$	$S_{\lg\sigma}$	S_{b_0}
Натура $K_{вз}=0{,}4$	56	0,1992	0,5490	0,7733	−0,7914	2,2003	0,2806	0,0289	0,1225
Модель $K_{вз}'=0{,}4$	27	0,1639	0,3360	0,6379	−0,3969	2,3351	0,3106	0,0724	0,1253

Таблица 3

$P(f)$ в %	K	Уравнение (2)		
		Натура ($K_{вз}=0{,}4$)	Модель ($K_{вз}'=0{,}4$)	Модель ($K_{вз}'=0{,}8$)
10	+1,24	$\lg f_1=-0{,}3323+0{,}1729$	$\lg f_1=-0{,}3720+0{,}1890$	$\lg f_1=-0{,}2319+0{,}4006$
30	+0,53	$\lg f_2=-0{,}3323+0{,}2207$	$\lg f_2=-0{,}3720+0{,}2557$	$\lg f_2=-0{,}2319+0{,}4572$
50	0	$\lg f_3=-0{,}3323+0{,}2563$	$\lg f_3=-0{,}3720+0{,}3057$	$\lg f_3=-0{,}2319+0{,}4995$
70	−0,53	$\lg f_4=-0{,}3323+0{,}2919$	$\lg f_4=-0{,}3720+0{,}3553$	$\lg f_4=-0{,}2319+0{,}5418$
90	−1,24	$\lg f_5=-0{,}3323+0{,}3397$	$\lg f_5=-0{,}3720+0{,}4224$	$\lg f_5=-0{,}2319+0{,}5984$
99,9	−3,32	$\lg f_6=-0{,}3323+0{,}4797$	$\lg f_6=-0{,}3720+0{,}6180$	$\lg f_6=-0{,}2319+0{,}7644$

Таблица 4

$P(\sigma)$ в %	K	Уравнение (3)	
		Натура ($K_{вз}=0{,}4$)	Модель ($K_{вз}'=0{,}4$)
10	+1,24	$\lg\sigma_1=-0{,}3164\lg\sigma_0+2{,}2988$	$\lg\sigma_1=-0{,}4004\lg\sigma_0+2{,}3352$
30	+0,53	$\lg\sigma_2=-0{,}2959\lg\sigma_0+2{,}3696$	$\lg\sigma_2=-0{,}3490\lg\sigma_0+2{,}4074$
50	0	$\lg\sigma_3=-0{,}2806\lg\sigma_0+2{,}4223$	$\lg\sigma_3=-0{,}3106\lg\sigma_0+2{,}4585$
70	−0,53	$\lg\sigma_4=-0{,}2653\lg\sigma_0+2{,}4751$	$\lg\sigma_4=-0{,}2722\lg\sigma_0+2{,}4985$
90	−1,24	$\lg\sigma_5=-0{,}2448\lg\sigma_0+2{,}5459$	$\lg\sigma_5=-0{,}2208\lg\sigma_0+2{,}5782$
99,9	−3,32	$\lg\sigma_6=-0{,}1847\lg\sigma_0+2{,}7532$	$\lg\sigma_6=-0{,}0702\lg\sigma_0+2{,}7791$

чения f в первом случае сравнительно близки и их соотношение практически остается постоянным во всем интервале τ, что не наблюдается во втором случае. При совмещении полей рассеяния ϑ с $K_{вз}=K'_{вз}=0{,}4$ средневероятностные значения ϑ на модели несколько превышают величины ϑ на натуре. Как и для f поле рассеяния ϑ на модели больше и полностью перекрывает аналогичное поле для натуры.

Из анализа полученных результатов видно, что точность моделирования значительно зависит от $K_{вз}$ и необходимо стремится к сохранению условия $K'_{вз}=K_{вз}$. Несколько уменьшенное средневероятностное значение f на модели объясняется повышением температуры на образцах по сравнению с натурным объектом. Увеличение полей рассеяния f и ϑ на модели связано с более значительным влиянием случайных факторов на малогабаритные лабораторные образцы.

Для вероятностной оценки точности моделирования параметров трения вводится понятие коэффициента эффективности моделирования $K_f=f/f'$, $K_\vartheta=\vartheta/\vartheta'$. Получены уравнения (4) и (5) для определения вероятностных значений K_f и K_ϑ, учитывающие размеры и взаимные расположения областей рассеяния данных модельных и натурных испытаний.

$$\lg K_f=\lg\frac{f}{f'}=\lg f-\lg f'=(\overline{b'_{f\tau}}-\overline{b_{f\tau}})\tau+[(\overline{b_{f\tau}}\,\overline{\tau}-\overline{b'_{f\tau}}\,\overline{\tau'})+$$

$$+K(S_f-S'_f)+(\overline{\lg f}-\overline{\lg f'})]$$

или

$$\lg K_f=a_f\tau+c_f,$$

$$\lg K_\vartheta=\lg\frac{\vartheta}{\vartheta'}=\lg\vartheta-\lg\vartheta'=[(\overline{b_{\vartheta\tau}}+KS_{\vartheta\vartheta})-(\overline{b'_{\vartheta\tau}}+KS'_{\vartheta\vartheta})]\lg\tau+$$

$$+[\overline{\lg\tau'}(\overline{b'_{\vartheta\tau}}+KS'_{\vartheta\vartheta})-\overline{\lg\tau}(\overline{b_{\vartheta\tau}}+KS'_{\vartheta\vartheta})]+[(\overline{\lg\vartheta}-KS_{\vartheta\tau})-(\overline{\lg\vartheta'}-KS_{\vartheta\tau})]] \quad (5)$$

или

$$\lg K_\vartheta=a_\vartheta\cdot\lg\tau+c_\vartheta.$$

В табл. 5 представлены уравнения (4) и (5).

Таблица 5

K	Уравнение (4)			Уравнение (5)	
	$K'_{вз}=K_{вз}=0{,}4$		$K'_{вз}=0{,}8\neq K_{вз}$	$K'_{вз}=K_{вз}=0{,}4$	
$-1{,}21$	10	$\lg K_f=0{,}0397\tau+0{,}0161$	$\lg K_f=-0{,}1004\tau+0{,}2277$	10	$\lg K_\vartheta=-0{,}084\lg\tau-0{,}0364$
0	50	$\lg K_f=0{,}0397\tau+0{,}0494$	$\lg K_f=-0{,}1004\tau+0{,}2432$	50	$\lg K_\vartheta=-0{,}030\lg\tau-0{,}0362$
$-1{,}21$	90	$\lg K_f=0{,}0397\tau+0{,}0827$	$\lg K_f=-1{,}1004\tau+0{,}2587$	90	$\lg K_\vartheta=-0{,}024\lg\tau-0{,}0323$

В уравнении (4) c_f и a_f соответственно характеризуют уровень и интенсивность изменения коэффициента K_f. Как видно из табл. 5, значения c_f и a_f при $K'_{вз}=K_{вз}=0{,}4$ в несколько раз меньше, чем при $K'_{вз}=0{,}8\neq K_{вз}$. Поэтому средневероятностные значения K_f близки

к единице и более стабильны для первого случая. Так, например, при $l(f)=50\%$ и $\tau=0{,}1\div1{,}0$ в первом случае эти значения колеблятся в пределах $K_f=1{,}131\div1{,}121$, а во втором случае — $K_f=1{,}711\div1{,}390$ (рис. 1). Разброс данных K_f относительно средневероятностных значений при $l(f)=10\%$ и $l(f)=90\%$ соответственно составляет $\pm6\%$ и $\pm3{,}6\%$.

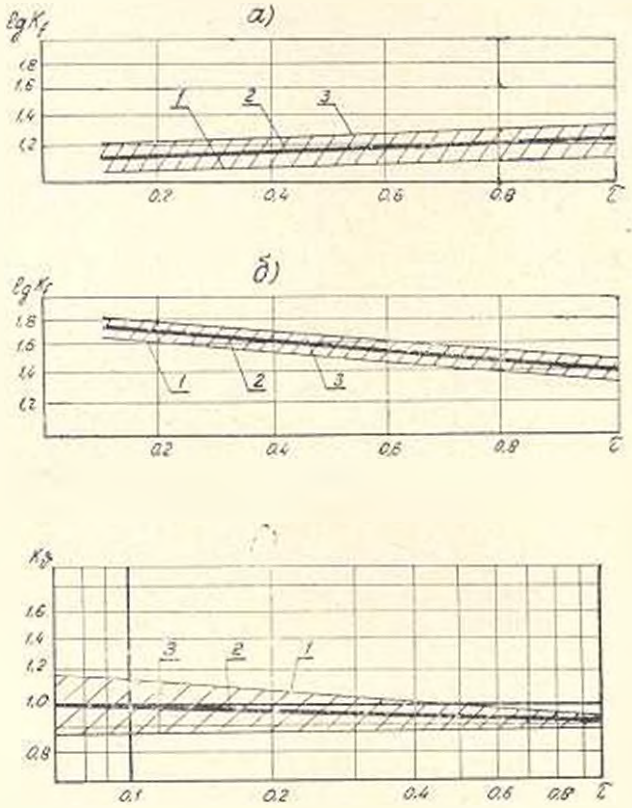

Рис. 1. Зависимости коэффициентов K_f и K_b от τ при а) $K_{в1}=K'_{в1}$; б) $K_{в2}=K'_{в2}$; в) $K_{в3}=K'_{в3}$.
Линии 1, 2 и 3 соответствуют $l(f)$, $l(b)$ 10, 50 и 90%.

Средневерояностные значения K_b во всем интервале τ незначительно отклоняются от единицы: при $\tau=0{,}1\div1{,}0$ $K_b=0{,}986\div0{,}920$. Разброс данных K_b с увеличением τ также уменьшается: при $\tau=0{,}1$ $l(b)=10\%$ и $l(b)=90\%$ разброс K_b относительно средневерояностных значений составляет $\pm12\%$, а при $\tau=1{,}0$ — $\pm0{,}5\%$.

Коэффициенты эффективности моделирования K_f и K_b помимо оценки точности моделирования могут иметь следующее практическое применение — при известных f' и b' на модели эти коэффициенты позволяют определить значения f и b на натуре с учетом точности моделирования.

ЕрПИ им. К. Маркса Поступило 9.III. 1972.

Ա. Կ. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Մ. Ֆ. ՍՏԱԿՅԱՆ

ԱՐՏԱՔԻՆ ՇՓՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՄԱՆ ՃՇՏՈՒԹՅԱՆ ՀԱՎԱՆԱԿԱՆԱՑՄԱՆ ԿԱՆԽԱՏԵՍՄԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Նմանության և չափողականության տեսության մեթոդների օգտագործման քննարկվում են այն գործոնները, որոնք կրկնակի-կարճատև շփման կերպային բեռնվածության ռեժիմի դեպքում ազդում են փորձամասի փորձանմուշների արտաքին շփման պրոցեսի մոդելավորման ճշտության վրա։ Բերված է շփման պարամետրերի մոդելավորման ճշտության նախանշականական գնահատականը և առաջարկված է մոդելավորման էֆեկտիվության գործակցի գործառույթը։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чичинадзе А. В.* Расчет и исследование внешнего трения при торможении. Изд. «Наука», 1967.
2. *Погосян А. К.* Новая методика лабораторных испытаний фрикционных материалов для тормозов подземно-транспортных машин. Сб. «Тепловая динамика трения». Изд. «Наука», 1970.
3. *Браун Э. Д., Погосян А. К.* Применение теории подобия и размерности для моделирования трения при повторно-кратковременном фрикционном тепловом нагружении. В сб. трудов пятой межвузовской конференции по физическому и математическому моделированию. «Применение цифрового моделирования». Изд. МЭИ, 1968.
4. *Веников В. А.* Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. Изд. «Высшая школа», 1966.
5. *Погосян А. К.* Точность моделирования процесса внешнего трения. «Вестник машиностроения», № 10, 1970.
6. *Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В.* Курс теории вероятностей и математической статистики. Изд. «Наука», 1965.
7. *Шашин М. Я.* Об оценке рассеяния значений циклической прочности. «Вестник машиностроения», № 2, 1965.
8. *Александров М. П., Погосян А. К., Стакян М. Г.* Применение методов математической статистики для определения параметров повторно-кратковременного трения. «Вестник машиностроения», № 8, 1972.