

СЕКЦИЯ 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.891

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ МНОГОДИСКОВОГО ТОРМОЗА

С. Н. Целуева, М. Ю. Целуев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Предложены эмпирические зависимости для величины коэффициента трения от скорости скольжения ряда фрикционных металлокерамических материалов при трении по углеродистой стали в среде масла. Выполнены численные исследования тепловой нагруженности фрикционных дисков для условий трения, имитирующих торможение колесного трактора. Получена зависимость для максимального приращения температуры фрикционных дисков при трении от ряда эксплуатационных параметров.

Ключевые слова: коэффициент трения, многодисковый тормоз, фрикционный диск, пара трения, фрикционный нагрев, численный эксперимент.

THERMAL CONDITION OF MULTIDISC BRAKE

S. N. Tselueva, M. Yu. Tseluev

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Empirical dependences are proposed for the value of the friction coefficient on the sliding speed of a number of friction materials during friction against carbon steel in an oil. Numerical studies of the thermal loading of friction discs for friction conditions simulating the braking of a wheeled tractor have been carried out. The dependence for the maximum increase in the temperature of friction discs during friction on a number of operational parameters has been obtained.

Keywords: friction coefficient, multidisc brake, friction disc, friction pair, friction heating, friction field, numerical simulation.

Повышение требований к ресурсу и энергоемкости тормозных систем привело к созданию и применению в тракторах и карьерных самосвалах многодисковых тормозов, фрикционные диски которых работают в среде масла [1, 2]. Несмотря на совершенствование конструкций, материалов и технологий изготовления, важной проблемой при эксплуатации остается влияние фрикционного нагрева дисков на параметры работы многодисковых тормозов. Высокие температуры трения являются причиной интенсивного изнашивания и коробления дисков, что ведет к снижению ресурса и отказу многодисковых тормозов [3]. В связи с этим прогнозирование уровня нагрева фрикционных дисков на стадии проектирования является важной и актуальной проблемой при создании многодисковых тормозов тракторов и карьерных самосвалов.

Цель работы – численное исследование влияния эксплуатационных параметров на величину нагрева фрикционных дисков многодискового тормоза в условиях работы, имитирующих служебные торможения колесного трактора.

Методы исследования. Исследование теплового режима пар трения осуществляли на примере экспериментальной конструкции остановочного многодискового тормоза колесного трактора, пары трения которого взаимодействуют в среде масла. При включении тормоза осуществляется трение между вращающимися фрикционными и неподвижными стальными дисками, сопровождающееся их нагревом вследствие диссипации механической энергии. Тепловой режим, определяющийся температурным полем в паре трения, зависит от многих факторов, в том числе от мощности и продолжительности трения, интенсивности охлаждения, конструкции и материалов дисков тормоза.

Эмпирические зависимости коэффициента трения от скорости скольжения в среде масла для ряда металлокерамических фрикционных материалов по углеродистой стали были получены путем математической обработки экспериментальных данных, приведенных в [4], методом наименьших квадратов.

Динамику изменения скорости V скольжения дисков, необходимую для определения интенсивности теплового источника в парах трения, исследовали на одно-массовой механической модели тормозного механизма путем решения соответствующего дифференциального уравнения движения фрикционных дисков методом Рунге–Кутты четвертого порядка точности с учетом зависимости момента трения M дисков от скорости скольжения:

$$M = p \iint_S \mu r dS, \quad (1)$$

где p – контактное давление в паре трения; $\mu = \mu(V)$ – коэффициент трения скольжения в паре трения тормоза, зависящий от скорости скольжения; r – текущий радиус трения; S – площадь номинального фрикционного контакта в паре трения.

Теоретические исследования теплового режима многодискового тормоза при нагрузочно-скоростных режимах трения дисков, имитирующих служебные торможения трактора, осуществляли в процессе многовариантных численных решений тепловой задачи [5], описывающей нестационарное осесимметричное температурное поле во фрикционной паре многодискового тормоза с учетом теплофизических характеристик материалов, конструкционных и эксплуатационных параметров дисков, методом конечных элементов. В качестве варьируемых факторов в ходе исследования были выбраны момент трения и начальная угловая скорость скольжения дисков, приведенный к валу тормоза момент инерции движущихся масс транспортного средства. Численные исследования осуществляли для фрикционных дисков с накладками из фрикционного металлокерамического материала МК-5.

Результаты исследования. Статистическая обработка экспериментальных данных, приведенных в работе [4], позволила получить эмпирические зависимости для величины коэффициента трения от скорости скольжения фрикционных материалов следующего вида:

$$\mu = \mu_k + (\mu_k - \mu_s) \exp(-kV^n), \quad (2)$$

где μ_k – коэффициент трения при скорости скольжения дисков свыше 15 м/с; μ_s – коэффициент трения покоя; k, n – эмпирические коэффициенты.

Полученные числовые значения эмпирических параметров, входящих в зависимость (2), для ряда фрикционных металлокерамических материалов при трении по углеродистой стали в среде масла приведены в таблице.

**Значения эмпирических параметров модели (2)
для ряда фрикционных материалов**

Обозначение материала	μ_k	μ_s	k	n
МК-5	0,050	0,117	0,437	1,199
Шадеф (ИПМ НАН Беларуси)	0,069	0,156	0,643	0,656
HS-43 (Hoerbiger, Австрия)	0,072	0,129	0,071	1,484
HS-09 (Hoerbiger, Австрия)	0,075	0,117	0,031	1,942

Графические зависимости, приведенные на рис. 1, свидетельствуют об обратной нелинейной зависимости коэффициента трения рассматриваемых фрикционных материалов от скорости скольжения дисков в интервале скоростей до 10 м/с. При дальнейшем росте скорости скольжения коэффициент трения дисков изменяется незначительно.

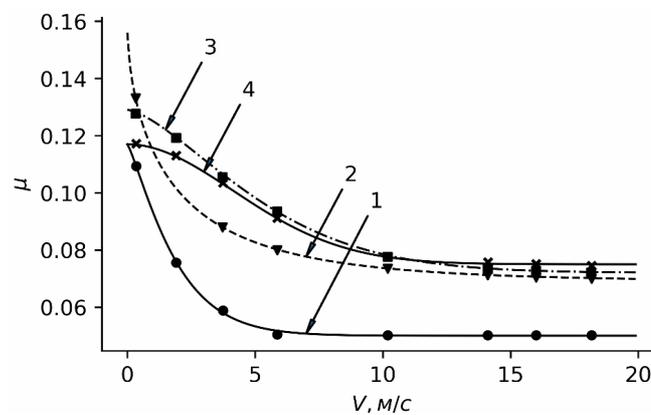


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения ряда фрикционных материалов по стали в среде масла от скорости скольжения:
1 – МК-5; 2 – ШАДЕФ; 3 – HS43; 4 – HS09

Для фрикционных пар многодискового тормоза в исследованных режимах трения установлено, что скорость роста и уровень развиваемых температур на фрикционном контакте пары трения увеличиваются с повышением мощности и продолжительности трения дисков, а также снижением интенсивности теплообмена дисков с окружающей средой. Максимальная температура фрикционного контакта дисков имеет нелинейную с максимумом зависимость от времени. Для рассмотренных условий трения дисков максимум температуры фрикционного контакта дисков наблюдается на поверхности трения в интервале радиусов ρ трения, удовлетворяющих условию $(\rho-r)/(R-r) = 0,65-1,0$ (R, r – внешний и внутренний радиус трения), в момент времени, находящийся в интервале 0,7–0,9 от времени торможения.

Математическая обработка результатов численного эксперимента методом наименьших квадратов позволила получить функциональную зависимость для максимального приращения температуры на фрикционном контакте дисков от величины рассмотренных параметров работы:

$$\Delta T_{\max} = 0,6M\omega + \frac{J\omega^2}{zm} \left(2,45 - \frac{0,04J\omega}{zmM} \right), \quad (3)$$

где ω – начальная угловая скорость вала тормоза; J – момент инерции масс транспортного средства, приведенный к валу тормоза; m – число пар трения в многодисковом тормозе; z – число тормозных механизмов.

Полученная зависимость (3) может быть использована для инженерных оценок величины развиваемой температуры на фрикционном контакте пар трения проектируемых многодисковых тормозов в зависимости от нагрузочно-скоростных режимов трения дисков, а также выбора эксплуатационных параметров, обеспечивающих работу тормоза с допустимой температурой нагрева пар трения.

Литература

1. Заболоцкий, М. М. Применение многодисковых маслоохлаждаемых тормозов на карьерных самосвалах БелАЗ / М. М. Заболоцкий, Г. И. Лось // Горн. журн. – 2008. – № 9. – С. 41–42.
2. Городецкий, К. И. Принудительное жидкостное охлаждение дисковых фрикционных сцеплений и тормозов / К. И. Городецкий, О. В. Евтушик, В. М. Шарипов // Тракторы и сельхозмашины. – 2000. – № 12. – С. 21–24.
3. Результаты испытаний фрикционных дисков из различных материалов для гидромеханических передач самосвалов «БелАЗ» / А. Ф. Ильющенко, [и др.] // Трение и износ. – 2011. – Т. 32, № 3. – С. 248–255.
4. Шарипов, В. М. О коэффициенте трения в контакте пар трения фрикционных муфт в коробках передач автомобилей и тракторов при переключении передач без разрыва потока мощности / В. М. Шарипов, М. И. Дмитриев, К. И. Городецкий // Наука и образование. – 2016. – № 8. – С. 21–30.
5. Исследование теплового режима пар трения многодискового тормоза / В. П. Сергиенко [и др.] // Трение и износ. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 555–564.

УДК 681.511.4

СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНО-ВРЕМЕННЫМ ОПЕРАТОРНЫМ МЕТОДОМ

А. В. Козлов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Системы автоматического управления очень часто имеют в своем составе нелинейные элементы, что значительно усложняет их анализ и синтез. Традиционный подход к исследованию подобных систем имеет ряд трудностей из-за необходимости вычислять интеграл свертки от переменных. Альтернативой подобному подходу является применение многомерного интегрального преобразования по Лапласу.

Ключевые слова: синтез, анализ, регулятор, метод, система.

SYNTHESIS OF SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL BY MULTIDIMENSIONAL-TEMPORARY OPERATOR METHOD

A. V. Kozlov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Automatic control systems very often have nonlinear elements, which greatly complicates their analysis and synthesis. The traditional approach to investigating such systems has a number of difficulties due to the need to calculate the convolution integral from variables. An alternative to such an approach is the use of a multidimensional integral Laplace transform.

Keywords: synthesis, analysis, regulator, method, system.