

УДК 622.625.28-592.112(043.5)

Коптовец А.Н., д-р техн. наук, доцент
(ГВУЗ «НГУ»)

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ТОРМОЗА ШАХТНЫХ
ЛОКОМОТИВОВ В УСЛОВИЯХ СТРУКТУРНОЙ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Коптовец О.М., д-р техн. наук, доцент
(ДВНЗ «НГУ»)

**ИДЕНТИФІКАЦІЯ СТАНУ ГАЛЬМА ШАХТНИХ ЛОКОМОТИВІВ В
УМОВАХ СТРУКТУРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Koptovets A.N., D.Sc. (Tech), Associate Professor
(SHEI «NMU»)

**IDENTIFICATION OF MINE LOCOMOTIVE BRAKE STATE IN
TERMS OF STRUCTURAL UNCERTAINTY**

Аннотация. Впервые разработана регрессионная модель кинетической характеристики трения колодочно-колесного тормоза шахтных локомотивов в условиях структурной неопределенности по количеству и составу входных переменных в моделях зависимости силы (коэффициента) трения. Исключить неустойчивые решения позволяет применение всех видов статистического анализа: дисперсионного, корреляционного, регрессионного и дискриминантного. Из условия максимума дискриминантной функции получена линейная модель изменения коэффициента трения тормоза от тормозного нажатия до 12 кН и скорости скольжения до 5 м/с, которая в рабочем процессе определяет показатели эффективности тормоза. Выполнена проверка гипотезы об адекватности модели. Коэффициенты регрессионной модели характеристики трения изменяются при изменениях геометрии конструктивных связей в тормозном механизме, характеристики шероховатости контактной поверхности колодки, механических свойств материала тормозной колодки, упругих и диссипативных сил нагружения тормоза.

Ключевые слова: статистический анализ, адекватность моделей, тормоз, структурная неопределенность, идентификация состояния.

Цель – определение вида структурной неопределенности при идентификации состояния тормоза для адаптивного управления трибологической системой (механической системой с трением).

Современной научной практике известны [1] следующие факторы, обуславливающие силы трения: 1) скорость скольжения; 2) удельное нормальное давление; 3) температура; 4) фактическая площадь контакта; 5) форма и конфигурация поверхности трения; 6) наличие продуктов износа; 7) упруго-вязкий характер деформации поверхностей трения, зависящий от механических свойств элементов трущейся пары и обуславливаемый модулями продольной и поперечной упругости; 8) характер поверхности или физическое состояние поверхностного слоя элементов трущейся пары, определяемый плотностью материала;

9) степень свободы элементов трущейся пары, зависящая от способа закрепления; 10) влажность поверхности трения; 11) удельная теплоемкость; 12) коэффициент теплопроводности; 13) температуропроводность; 14) коэффициент теплоотдачи; 15) коэффициент динамической вязкости. В настоящее время предложено более 13 эмпирических соотношений между коэффициентом трения и скоростью скольжения для конкретных видов объектов техники.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить решение задачи статистического моделирования, которое характеризуется следующим видом структурной неопределенности [2]: по количеству и составу входных переменных в моделях зависимости силы (коэффициента) трения тормоза как выходных переменных.

Задача сводится к регрессионному анализу в предположении, что статистическая модель объекта имеет вид

$$y = y^0 + \xi = \sum_{j=1}^m \Theta_j x_j + \xi,$$

где y – наблюдаемая входная переменная; y^0 – ненаблюдаемая составляющая выходной переменной; ξ – случайная величина с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией; x_j – j -я входная переменная объекта из множества $X^0 \subseteq X$, участвующих в формировании выходной переменной объекта; m – число Θ – вектор неизвестных, не равных нулю коэффициентов.

Задача регрессионного анализа поставлена в широком смысле, то есть необходимо установить, какие именно входные переменные $X^0 \subseteq X$ входят в регрессионную модель (X – заданное множество наблюдаемых входных переменных, а множество X^0 – неизвестно). Также необходимо определить оценки коэффициентов в моделях регрессии для выходной переменной как функции всех входных переменных и определить оценку ошибки предсказания по этой модели.

Процесс трения в тяжело нагруженных трибологических системах, каким является тормоз, отличается сложностью взаимодействия рабочих параметров.

Современные методы анализа не позволяют получать аналитически выходные характеристики тормоза по входным параметрам режимов его работы. Этим объясняется преобладание эмпирических методов при исследовании эффективности и надежности фрикционных тормозов.

Анализ выполненных экспериментальных исследований трибологических систем показывает, что результаты, полученные различными авторами, неоднозначны и несопоставимы.

Так, изменение коэффициента трения впервые выражено в 1861 году эмпирической формулой гиперболического вида. За прошедший период зависимость

уточняли выражениями экспоненциального вида и полиномами различной степени. До настоящего времени на железнодорожном транспорте пользуются зависимостью коэффициента трения тормозных колодок от скорости скольжения и усилия нажатия в гиперболической форме. Вид формулы выбран "принимая во внимание все обстоятельства и результаты опыта. Кроме того, чтобы можно было бы применить расчет по приведенному коэффициенту трения" [3]. В институте Машиноведения разработан закон, позволяющий аппроксимировать значительное число видов экспериментальных зависимостей [4].

Анализ свидетельствует о том, что аппроксимация экспериментальных зависимостей характеристик тормоза, в частности коэффициента трения, строится из общей предпосылки, что функция в интервале измерения удовлетворяет теореме Вейерштрасса, утверждающей, что для непрерывной на замкнутом интервале функции можно построить последовательность полиномов, которая будет равномерно стремиться к этой функции на всем промежутке интервала. Полиномиальный ряд при этом каждый исследователь ограничивает исходя из феноменологических представлений, что является причиной неустойчивости решений. Такой подход в выборе аппроксимирующей функции отражает определенную точку зрения части специалистов. Они считают [5], что выбор функции находится за пределами человеческих возможностей и поэтому тип функций следует выбрать произвольно, эмпирически подбирая наиболее удобный вид модели. Противоположная точка зрения заключается в том, что тип функции должен быть строго обоснован. Некоторый единый подход к различным видам эксперимента и представлению его результата дают современные методы математической статистики и теории вероятности.

В случае невозможности обоснования типа функции для построения модели, несколько алгебраических формул подвергают статистическому анализу. Возможна ситуация, когда степень соответствия исходных данных и значений, вычисленных по каждому уравнению, идентична. Отдать предпочтение одной из моделей при этом невозможно и целью дальнейшего анализа является отыскание такой области экспериментальных условий, в которой можно было бы выделить одну из предложенных моделей. Условия проведения $(n + 1)$ -го опыта определяются дискриминантным анализом по методу Бокса-Хилла [6]. Применение метода дало нам возможность построить математическую модель, адекватно описывающую изменение коэффициента трения φ колодочно-колесного тормоза шахтных локомотивов в зависимости от скорости движения V и усилия нажатия тормозных колодок K .

Исходные данные при этом анализировали 4-мя типами уравнений. Показатели связи для каждой группы данных приведены в табл. 1. Мера идентичности (R) не позволяет выделить лучшую модель.

Экспериментирование продолжали до тех пор, когда вероятности получения по каждой формуле определенного значения φ различились.

Следовательно, линейная модель

$$\varphi = 0,731 - 0,202 \cdot 10^{-1} K - 0,85 \cdot 10^{-1} V \pm 0,0015$$

наилучшим образом описывает изменение коэффициента трения в области экспериментальных условий – скорости движения 1...3 м/с и тормозного нажатия колодок 4,3...11,5 кН и может применяться в качестве характеристики рабочего процесса колодочно-колесного тормоза локомотивов.

Стабильность коэффициента трения тормоза составляет

$$\alpha_{ст} = \frac{\varphi_{ср}}{\varphi_{max}} = 0,74$$

и на 96% ($R = 0,96$) определяется нагрузочным и скоростным режимами.

При этом план эксперимента предусматривал получение выборки в результате натурных стендовых и ходовых испытаний тормоза. Текущие значения коэффициента трения определены по формуле Амонтона-Кулона, силы трения и нормального давления тормозной колодки выполнены прямыми измерениями.

Исключить неустойчивые решения позволяет применение всех видов статистического анализа: дисперсионного, корреляционного, регрессионного и дискриминантного. Из условия максимума дискриминантной функции получена линейная модель изменения коэффициента трения φ тормоза от тормозного нажатия K до 12 кН и скорости скольжения V до 5 м/с, которая в рабочем процессе определяет показатели эффективности тормоза. Поиск оптимального множества регрессоров в задаче регрессионного анализа позволил достичь меры идентичности (коэффициент множественной корреляции) 0,96, частные коэффициенты корреляции 0,69 и 0,71 указывают на одинаковую степень влияния K и V на φ , другими факторами можно пренебрегать, в частности общим влиянием KV и фрикционным нагревом. Проверка адекватности модели по F -критерию с уровнем достоверности 0,95 подтверждается высокой сходимостью при значениях выборочных дисперсий входных факторов $25,39 \cdot 10^{-3}$ и случайного фактора $2,64 \cdot 10^{-3}$, стандартная ошибка коэффициента трения составляет 0,0514.

Выводы. Для колодочно-колесного тормоза шахтных локомотивов имеет место падающая кинетическая характеристика трения высокой интенсивности, что требует управления силой трения в тормозном механизме. Математическая теория трения не рассматривает зависимость силы трения от скорости скольжения. Тормоз, как трибологическая система, обладает видом структурной неопределенности по количеству и составу входных переменных в моделях зависимостей силы (коэффициента) трения, как выходных переменных. Коэффициенты регрессионной модели характеристики трения изменяются при изменении геометрии конструктивных связей в тормозном механизме в процессе износа тормозных колодок, при изменении характеристики шероховатости контактной поверхности колодки до равновесной в процессе приработки, при изменении механических свойств материала в результате изменения химсостава чугуна тормозной колодки, при изменении упругих и диссипативных свойств в кинематической цепи нагружения тормозных механизмов, включая использование

пневмопривода и передачи, при попадании в зону трения колодки и колеса влаги и грязи с опорной поверхности рельса в промышленном эксперименте, что является граничной смазкой, которая демпфирует фрикционные колебания в тормозных механизмах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по триботехнике. Т. 3. Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебты, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
2. Сарычев, А.П. Идентификация состояний структурно-неопределенных систем / А.П. Сарычев. – Д.: НАН Украины и НКА Украины, Ин-т технической механики, 2008. – 268 с.
3. Гребенюк, П.Т. Правила тормозных расчетов / П.Т. Гребенюк. – М.: Интекст, 2004. – 111 с.
4. Чичинадзе, А.В. Расчет режимов работы тормозных устройств / А.В. Чичинадзе, А.Г. Гинзбург, Л.Б. Лисовская // Вестник машиностроения. – 1970. – С. 13 – 18.
5. Френкель, А.А. Многофакторные корреляционные модели производительности труда // А.А. Френкель. – М.: Экономика, 1966. – 263 с.
6. Мирзаджанзаде, А.Х. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа / А.Х. Мирзаджанзаде. – М.: Недра, 1997. – 165 с.

REFERENCES

1. Hebty, M. and Chichinadze, A.V. (1989), *Spravochnik po tribotehnike. T.3. Teoreticheskie osnovy* [Reference book on trybotecnics. Vol. 3. Theoretical bases], Mashinostroeniye, Moscow, Russia.
2. Sarychev, A.P. (2008), *Identifikaciya sostoyaniy strukturno-neopredelennykh sistem* [Authentication of the states of the structurally-indefinite systems], Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Grebenjuk P.T.(2004), *Pravila tormoznykh raschetov* [Rules of brake calculations] , Moscow, Russia.
4. Chichinadze, A.V., Ginzburg, A.G. and Lisovskaja, L.B., (1970), “Calculation of the modes of operations of brake devices ”, *Vestnik mashinostroyeniya*, pp. 13 – 18.
5. Frenkel, A.A., (1966), *Mnogofaktornye korrelyacionnyye modeli proizvoditelnosti truda* [Multifactor correlation models of labour productivity], Ekonomika, Moscow, Russia.
6. Mirzadzhanzade, A.H., (1997), *Matematicheskaya teoriya eksperimenta v dobyche nefiti i gaza* [Mathematical theory of experiment in the booty of oil and gas], Nedra, Moscow, Russia.

Об авторе

Коптовець Олександр Миколайович, доктор технічних наук, доцент, Государственное высшее учебное заведение «Національний горний університет», Днепропетровск, Украина, kaksejchas_inna@mail.ru

About the author

Koptovets Aleksandr Nikolayevych, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, State Higher Education Institute «National Mining University», Dnepropetrovsk, Ukraine, kaksejchas_inna@mail.ru

Анотація. Вперше розроблена регресійна модель кінетичної характеристики тертя колодково-колісного гальма шахтних локомотивів в умовах структурної невизначеності за кількістю і складом вхідних змінних в моделях залежності сили (коефіцієнта) тертя. Виключити нестійкі рішення дозволяє застосування різних видів статистичного аналізу: дисперсійного, кореляційного, регресійного і дискримінантного. З умови максимуму дискримінантної функції отримана лінійна модель зміни коефіцієнта тертя гальма від гальмівного натиснення до 12 кН і швидкості ковзання до 5 м/с, яка в робочому процесі визначає показники ефективності гальма. Виконано перевірку гіпотези про адекватність моделі. Коефіцієнти регресійної моделі характеристики тертя змінюються при змінах геометрії конструктивних зв'язків в гальмівному механізмі, характеристики шорсткості контактної поверхні колодки, механічних властивостей матеріалу гальмівної колодки, пружних і дисипативних сил навантаження гальма.

Ключеві слова: статистичний аналіз, адекватність моделей, гальмо, структурна невизначеність, ідентифікація стану.

Abstract. Regressive model of kinetic characteristic for mine locomotive tread and wheel brake friction in terms of structural uncertainty as for the quantity and composition of input variables in friction models of force dependence (coefficient) has been developed for the first time. Application of all types of statistic analysis (disperse, correlative, regressive, and discriminant) makes it possible to eliminate unstable solutions. Linear variation model of brake friction coefficient φ on brake pressure up to 12 kN and slipping velocity V up to 5 m/sec determining indices of braking efficiency in operation has been obtained from discriminant function maximum. Hypothesis of the simulation model adequacy has been tested. The regressive model friction characteristic coefficients vary depending upon changes in the geometry structure of brake, mechanical properties of shoe contact surface roughness as well as elastic and dissipative forces of break loading.

Key-words: static analysis, adequacy of models, brake, structural uncertainty, state identification.

Статья поступила в редакцию 15.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Т.В. Бунько