

УПРАВЛЕНИЕ ПРИЖИМНОЙ НАГРУЗКОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ТРИБОПАР

В. М. МУСАЛИМОВ, Р. В. ПЕЧЕНКО, М. В. АБРАМЧУК, М. Х. ЦВЕТКОВА

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: musvm@yandex.ru*

Предложены подходы к созданию экспериментальной базы триботехники. Исследована бифуркационная составляющая трения скольжения. Разработан алгоритм автоматического перемещения нагрузочной платформы, исключающий работу оператора. Оригинальность решения проблемы нагружения состоит в использовании параметров структурной модели, полученных при параметрической идентификации динамической системы фрикционного взаимодействия. Описана мехатронная установка Трибал, обеспечивающая возможность исследования динамических характеристик в режиме реального времени. Для решения задач использован аппарат теории катастроф.

Ключевые слова: мехатронная система, Трибал, теория катастроф, бифуркация, трибопара

Мехатронная установка „Трибал-Т“. Для исследования динамических характеристик трибологических процессов разработано устройство Трибал. Общий вид установки Трибал [1] представлен на рис. 1 (1 — верхняя и нижняя платформы; 2 — датчики линейных перемещений; 3, 4 — датчики нормальной и тангенциальной нагрузки соответственно; 5 — направляющие линейных перемещений; 6 — блок управления приводом нагружения; 7 — блок контроля привода возвратно-поступательного движения; 8 — привод циклического возвратно-поступательного движения; 9 — привод нагружения; 10 — роликовые направляющие). К верхней и нижней платформам 1 крепятся три пары образцов (шесть цилиндров), трущихся торцами. Плоский контакт обеспечивается тем, что верхняя платформа имеет люфт благодаря роликовым направляющим 10. Люфт обеспечивает самоустановку образцов и плоский трехточечный контакт. Обе платформы при работе установки осуществляют возвратно-поступательное движение. С помощью привода нагружения 9 верхняя платформа прижимается к нижней. Затем привод 8 реализует циклическое возвратно-поступательное движение нижней платформы. За счет сил трения верхняя платформа принудительно циклически перемещается. Подобное принудительное движение верхней платформы, обусловленное силами трения, является важным отличием установки Трибал от аналогичных машин трения. Эти движения регистрируются датчиками линейных перемещений 2, а данные, поступающие на компьютер, являются входом и выходом идентификационной модели.

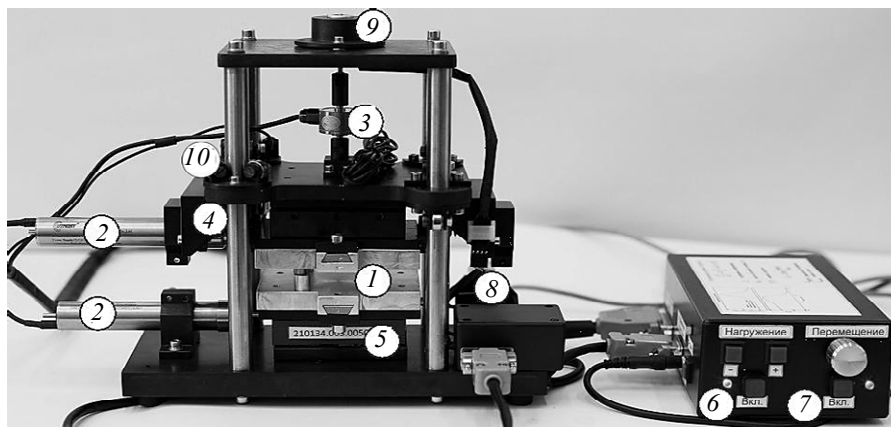


Рис. 1

Технические характеристики установки Трибал:

- амплитуда перемещения нижней платформы 1—5 мм;
- частота движения нижней платформы 1—5 Гц;
- сила нагружения 3—30 Н.

Проблемным узлом системы является узел нагружения. Это связано с тем, что пережим и недожим в трибопаре являются критическими моментами. В первом случае верхняя платформа объединяется с нижней платформой в одно целое. Во втором случае перемещается только нижняя платформа, а верхняя остается неподвижной.

Реализовать управление [2, 3], используя для этих целей механотрон [4, 5], не удалось из-за сложностей настройки системы нагружения, с одной стороны (в качестве управляющего параметра выбран просвет-дельта между платформами).

Бифуркационное трибовзаимодействие. В работах [6, 7] предложено использовать теорию упругой устойчивости [2, 3] для развития подхода к вычислению бифуркационной составляющей трения скольжения. Ключевым элементом служила мера шероховатости: среднее арифметическое R_a из абсолютных значений отклонений профиля шероховатости в пределах базовой длины. Таким образом, стержень длиной R выбран в качестве эквивалентным элементом, который при взаимодействии с верхней платформой обеспечивал сопротивление ее перемещению. Необходимо было рассчитать устойчивость этого стержня. Решение задачи показало, что квадрат угловой частоты ω^2 уменьшается при увеличении сжимающего усилия P .

На рис. 2 приведен график изменения частоты от сжимающего усилия:

$$\frac{\omega^2 m R^3}{EJ} + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{P R^2}{EJ} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^4, \quad (1)$$

J — геометрический момент инерции; E — модуль упругости (Юнга) (для алюминия $E=70\,000$ МПа); ω — частота собственных колебаний; m — масса образца.

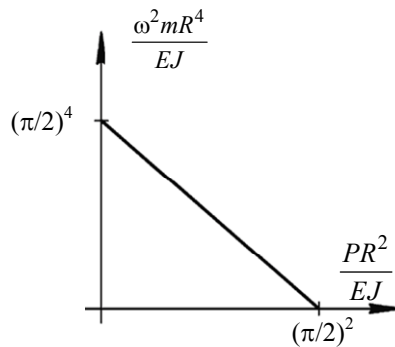


Рис. 2

Получим безразмерные величины:

$$W = \frac{\omega^2 m R^3}{EJ}; \quad V = \frac{P R^2}{EJ}. \quad (2)$$

Перепишем (1) с учетом (2):

$$\frac{W}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^4} + \frac{V}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2} = 1, \quad (3)$$

далее обозначим:

$$W = W_1^2, \quad V = V_1^2. \quad (4)$$

Получим уравнение эллипса:

$$\frac{V_1^2}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2} + \frac{W_1^2}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^4} = 1. \quad (5)$$

Переход к W и V осуществляется по формуле (4). Далее представим (5) в другой форме:

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{\pi}{2} \sin(t), \\ W_1 &= \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cos(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения (6) — это параметрическое представление эллипса.

Анализ результатов. На примере фрикционного взаимодействия трибопар А1-А1 [8] рассмотрим предложенный подход к установлению режима нагружения платформ. На рис. 3 представлены графики перемещения нижней (вход) и верхней (выход) платформ. Выбор канонической формы для переменных состояния [9] процесса позволил идентифицировать матрицу этих переменных

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -0,36 & 0,89 \end{pmatrix},$$

где элемент a_{21} есть $\omega^2 = 0,36$ — частота собственных колебаний модельного уравнения, а a_{22} — приведенный коэффициент демпфирования.

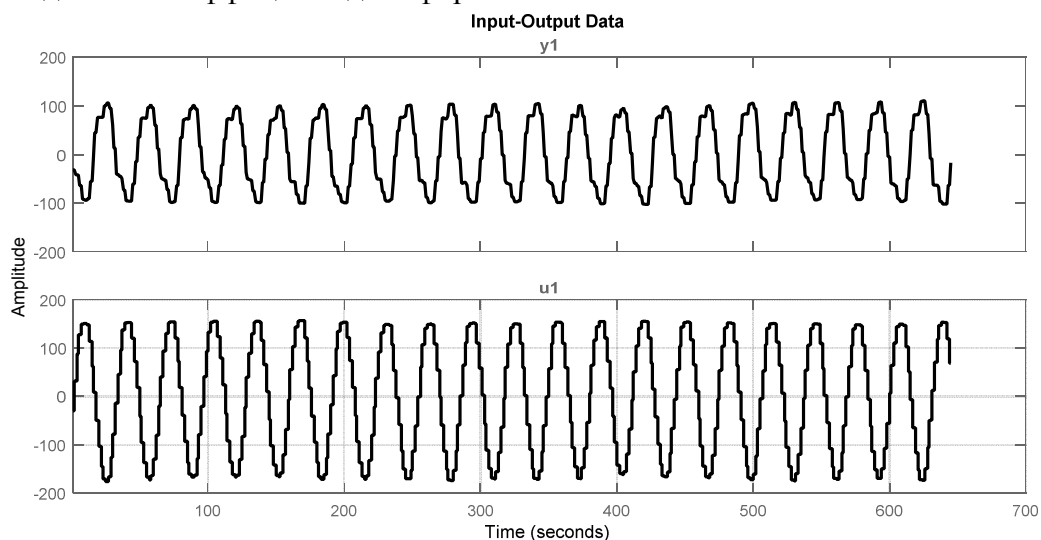


Рис. 3

Адекватность модели проверялась по формуле при использовании пакета MATLAB:

$$fit = \frac{norm(yh - y)}{\sqrt{length(y)}},$$

где $norm$ — норма вектора, $length$ — длина вектора, y — вектор выходного сигнала, yh — вектор модельного выходного сигнала. На рис. 4 представлена оценка адекватности модели второго порядка значения y и yh (пунктир — экспериментальные данные, сплошная кривая — данные модели, $fit=80,41$).

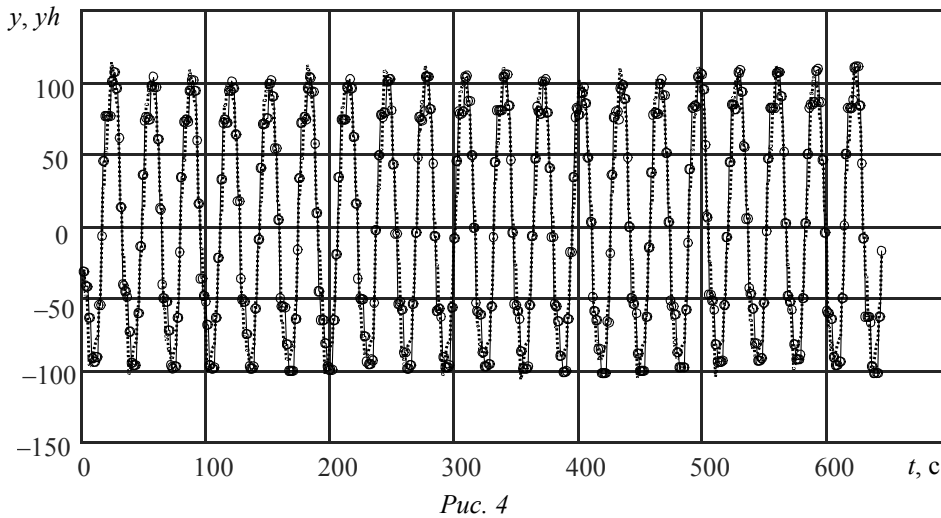


Рис. 4

На рис. 5 представлен построенный по уравнениям (6) график (линейная (штриховая) зависимость $W(V)$ и периодическая (эллипс) зависимость $W_1(V_1)$).

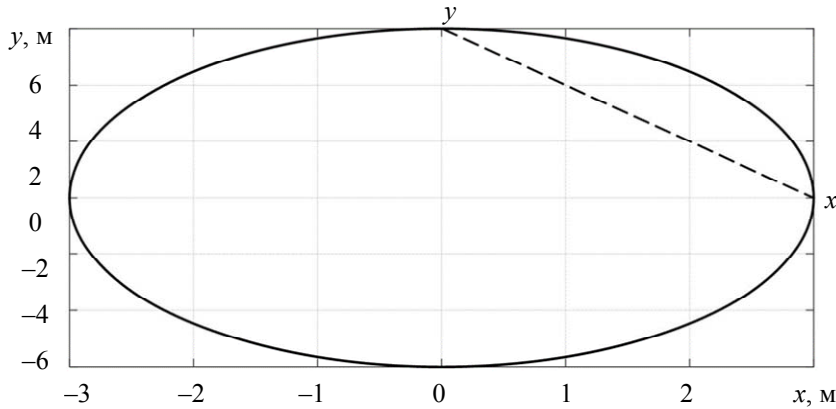


Рис. 5

Рабочая плоскость графика определяется положительными значениями абсцисс и ординат. Представление зависимости в виде (6) позволяет, во-первых, использовать в целях управления преимущество периодических функций. Физический смысл периодической функции y как производной функции x позволяет естественным образом использовать аппарат аналитической механики [10, 11] для современной постановки задачи управления нагружением.

Рассмотрим следующее выражение

$$\left(\frac{\pi}{4}\right)^4 = 6,09; \quad \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 = 2,47; \quad \frac{\pi}{2} = 1,57,$$

здесь максимальное значение $W = \left(\frac{\pi}{2}\right)^4$.

Воспользуемся этими зависимостями, чтобы записать (2):

$$\omega_*^2 = \frac{EJ}{mR^3} \left(\frac{\pi}{2}\right)^4.$$

Из (6) следует:

$$W_{1*} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^4 \cos(0),$$

таким образом, $\frac{EJ}{mR^3} = q \cos(t)$.

На начальной стадии нагружения, когда $\cos(0) = 1$, $\frac{J}{mR^3} = 10^{-10}$.

Воспользуемся полученным при идентификации значением $\omega^2 = 0,36$ — это текущее значение:

$$\begin{cases} \omega^2 = 0,36, \\ \omega_*^2 = 6 \frac{EJ}{mR^3}. \end{cases}$$

Чтобы получить значение $\omega^2 = 0,36$, нужно $\frac{EJ}{mR^3} \cdot \frac{0,36}{6} = 0,06$, откуда следует $\sin(1,51) = 0,9982$.

Вторая координата на графике эллипса численно равна $2,46 \cdot 0,9982 = 2,4551$, т.е.

$$\begin{aligned} \frac{PR^2}{EJ} &= \frac{\pi}{2} \cdot 2,4451, \\ P &= \frac{\pi}{2} \cdot 2,4451 \frac{EJ}{R^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Оценим порядок величин, соответствующий фазе (7)

$$\frac{PR^2}{J} \sim 10^{10} \rightarrow P \sim 10^{10} \frac{J}{R^2}, \text{ так как } E \sim 10^{10},$$

а также

$$\frac{1}{mR} \cdot \frac{J}{R^2} \sim 10^{-10}. \quad (8)$$

Примем, что $\frac{1}{mR} \sim 10^{-8}$, а $\frac{J}{mR} \sim 10^{-2}$.

Этот порядок находится в согласии с соотношением $\frac{\omega^2}{\omega_*^2} = 0,06 \frac{mR^3}{EJ}$.

В основе управления нагрузкой P , связанной с параметром идентификации ω^2 , лежит бифуркация фрикционного взаимодействия [6]. Более того, сама машина трения Трибал — устройство, предназначенное для подобных исследований.

Выводы. Выбор закономерности изменения безразмерных параметров частоты и силы (6) имеет ряд преимуществ по сравнению с линейным уравнением в отрезках (см. рис. 2 и 5).

Рассмотренный пример отражает соотношение частоты и силы нагрузки. Кроме того, установлено, что система нагружения движется между двумя состояниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. РФ 2244290 С1, МПК G01N 19/02 (2006.01). Устройство для испытания материалов на трение / В. М. Мусалимов, Г. М. Исмаилов, А. Д. Аникеенко, М. П. Ларичкин, Ю. А. Власов. Заяв. № 2003119011/28 от 24.06.2003; опубли. 01.10.2005.
2. Томпсон Дж. М. Е. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. М.: Мир, 1985. 254 с.
3. Болотин В. В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. М.: Физматлит, 1961. 340 с.
4. Ткачев А. Л. Трибометрическая установка с обратной связью в системе нагружения для исследования переходных процессов в режиме реального времени: дис. ... канд. тех. наук. СПб, 2010. 98 с.

5. Пат. СССР 662830 А1, МПК G01L 1/14(2006.01). Силоизмерительный датчик / Г. С. Берлин, А. М. Ростовцев, В. Р. Алавердов, Г. В. Маштакова. Заяв. № 2432083 от 23.12.1976; опубл. 15.05.1979.
6. Мусалимов В. М. Бифуркационная составляющая трения скольжения // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 8. С. 793—796.
7. Мусалимов В. М., Нуждин К. А. Моделирование внешней динамики фрикционного взаимодействия с применением теории устойчивости упругих систем // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 1. С. 68—76.
8. Печенко Р. В., Нуждин К. А., Абрамчук М. В., Мусалимов В. М. Точностные характеристики машин трения возвратно-поступательного действия // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 5. С. 442—448.
9. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. СПб: Питер, 2002. 448 с.
10. Хаар Д. Основы гамильтоновой механики. М.: Наука, 1974. 224 с.
11. Бутенин Н. В., Фуфаев Н. А. Введение в аналитическую механику. М.: Наука. 1991. 256 с.

Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: musvm@ya.ru
- Роман Владимирович Печенко** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: pechenko_rv@mail.ru
- Михаил Владимирович Абрамчук** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: abramchukmv@itmo.ru
- Мадина Хасановна Цветкова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: madinatcvetkova@bk.ru

Поступила в редакцию
03.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Мусалимов В. М., Печенко Р. В., Абрамчук М. В., Цветкова М. Х. Управление прижимной нагрузкой взаимодействующих трибопар // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 315—321.

CONTROL OF CLAMP LOAD OF INTERACTING TRIBOCOUPLE

V. M. Musalimov, R. V. Pechenko, M. V. Abramchuk, M. Kh. Tsvetkova

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: musvm@yandex.ru

Several approaches to the development of the experimental base of tribology are proposed. The bifurcation component of sliding friction is investigated. An algorithm for automatic movement of the loading platform is developed, which excludes the operator's work. The originality of the solution to the loading problem consists in using the parameters of the structural model obtained at parametric identification of a dynamic system of friction interaction. A Tribol mechatronics unit is described, which provides the possibility of studying dynamic characteristics in real time. The apparatus of the theory of catastrophes is used to solve the problems.

Keywords: mechatronic system, Tribol, catastrophe theory, bifurcation, tribocouple

REFERENCES

1. Patent RU 2244290 C1, G01N 19/02 (2006.01), *Ustroystvo dlya ispytaniya materialov na treniye* (Device for Testing Friction Materials), Musalimov V.M., Ismailov G.M., Anikeynko A.D., Larichkin M.P., Vlasov Yu.A. Patent application no. 2003119011/28, Priority 24.06.2003, Published 01.10.2005.
2. Thompson J.M.T. *Instabilities and Catastrophes in Science and Engineering*, NY, Wiley, 1982.
3. Bolotin V.V. *Nekonservativnye zadachi teorii uprugoy ustoychivosti* (Nonconservative Tasks of the Theory of Elastic Stability), Moscow, 1961, 339 p. (in Russ.)
4. Tkachev A.L. *Tribometrisheskaya ustanovka s obratnoy svyaz'yu v sisteme nagruzheniya dlya issledovaniya perekhodnykh protsessov v rezhime real'nogo vremeni* (Feedback Feedback Tribometric System for Real-Time Transient Studies), Candidate's Thesis, St. Petersburg, 2010, 98 p. (in Russ.)
5. Patent SU662830 A1, G01L 1/14(2006.01), *Siloizmeritel'nyy datchik* (Load Cell), Berlin G.S., Rostovtsev A.M., Alaverdov V.R., Mashtakova G.V. Patent application no. 2432083, Priority 23.12.1976, Published 15.05.1979. (in Russ.)

6. Musalimov V.M. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 8(60), pp. 793–796. (in Russ.)
7. Nuzhdin K.A., Musalimov V.M. *Journal of Friction and Wear*, 2019, no. 1(40), pp. 51–57.
8. Pechenko R.V., Nuzhdin K.A., Abramchuk M.V., Musalimov V.M. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 5(62), pp. 442–448. (in Russ.)
9. D'yakonov V., Kruglov V. *MATLAB. Analiz, identifikatsiya i modelirovaniye sistem* (MATLAB. Analysis, identification and modeling of systems), St. Petersburg, 2002, 448 p. (in Russ.)
10. Ter Haar D. *Elements of Hamiltonian Mechanics*, Pergamon Press, 1971.
11. Butenin N.V., Fufayev N.A. *Vvedeniye v analiticheskuyu mekhaniku* (Introduction to Analytical Mechanics), Moscow, 1991, 256 p. (in Russ.)

Data on authors

| | | |
|-----------------------------|---|--|
| Viktor M. Musalimov | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: musvm@ya.ru |
| Roman P. Pechenko | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: pechenko_rv@mail.ru |
| Michail V. Abramchuk | — | PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: abramchukmv@itmo.ru |
| Madina Kh. Tsvetkova | — | PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: madinatcvetkova@bk.ru |

For citation: Musalimov V. M., Pechenko R. V., Abramchuk M. V., Tsvetkova M. Kh. Control of clamp load of interacting tribocouple. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 4. P. 315–321 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-315-321