

ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАШИН ТРЕНИЯ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Р. В. ПЕЧЕНКО, К. А. НУЖДИН, М. В. АБРАМЧУК, В. М. МУСАЛИМОВ

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

Рассматриваются машины трения, отличительная особенность которых заключается в осуществлении принудительного движения исследуемых образцов относительно друг друга за счет передачи действия трением. Прослежена эволюция конструктивных составляющих этих машин, что позволило благодаря использованию современных приводов, прецизионных направляющих, датчиков перемещений, а также расположению трибопар повысить точностные характеристики машины. Предложен оригинальный подход к сравнению погрешностей машин первого и второго конструктивных вариантов с использованием цикловых диаграмм вход-выход для оценок формируемых ими площадей. Произведен сравнительный анализ качественных характеристик и относительных погрешностей приборов.

Ключевые слова: Трибал, возвратно-поступательное движение, конструкция, алгоритм обработки сигналов, оценка точности

Введение. Авторами настоящей статьи был проведен цикл опытно-конструкторских работ, направленных на создание прибора возвратно-поступательного действия, способного в режиме реального времени оценивать качество взаимодействующих поверхностей различных материалов. Идея заключалась в том, чтобы использовать входные данные измерительных устройств приводной платформы и выходные данные измерительных устройств второй платформы, движущейся за счет фрикционного взаимодействия [1, 2]. На платформах закреплялись образцы — трибопары. Исходные данные (вход-выход) использовались для параметрической идентификации процесса фрикционного взаимодействия, а непрерывная обработка сигналов позволяла осуществлять мониторинг изменяющихся во времени параметров — суть трибологических характеристик, по которым оценивается качество трущихся поверхностей [3].

С появлением современных комплектующих, таких как направляющие платформ, система датчиков перемещений и приводов, потребовалось модернизировать устройство [1, 2]. Более того, было решено устанавливать образцы трибопар таким образом, чтобы осуществлялось трехточечное распределенное по площади взаимодействие контробразцов. В практике испытаний укрепилось название этих устройств (машин трения): Трибал-2 (2006 г., [2]) и Трибал-Г (2016 г., [4]).

Была поставлена задача: сравнить точность этих машин, так как проблема заключалась не столько в смене датчиков на более точные, сколько в ответе на вопрос, в какой степени конструктивные составляющие могут изменять точность подобных измерительных устройств и что использовать в качестве меры точности.

Таким образом, целью исследований была разработка методов оценки точностных характеристик машин трения.

Принцип работы машин трения. Общий вид установок представлен на рис. 1, а, б: а — Трибал-2, где 1 — основание, 2 — направляющие, 3 — держатели образцов, 4 — образцы, 5 — упругий подвес, 6 — катки, 7 — кривошипно-ползунный механизм, 8 — винтовой домкрат, 9 — червячная передача, 10 — стойка, 11 — электропривод, 12 — электродвигатель, 13 — щупы, 14 — датчики перемещения, 15 — динамометр, 16 — блок управления, 17 — модуль АЦП/ЦАП, 18 — компьютер; б — Трибал-Т, где 1 — держатели образцов; 2 — датчики линейных перемещений; 3, 4 — датчики нормальной и тангенциальной нагрузки соответственно; 5 — направляющие линейных перемещений; 6 — блок управления приводом нагружения; 7 — контроль привода возвратно-поступательного движения; 8 — привод циклического возвратно-поступательного движения; 9 — привод нагружения.

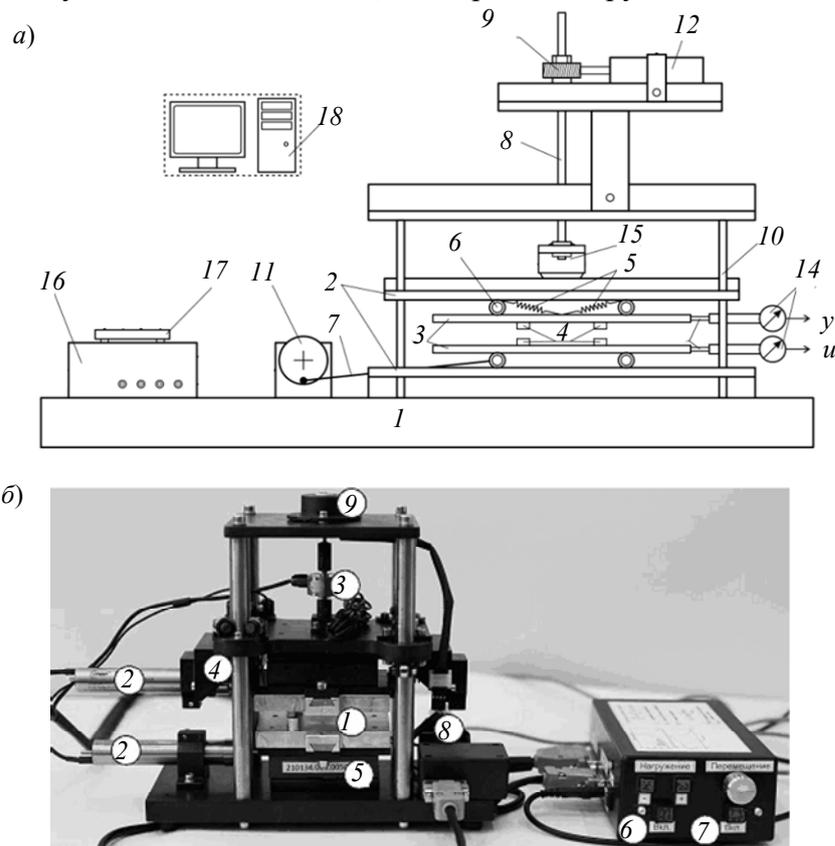


Рис. 1

На платформы 1 устанавливаются три пары образцов. Обе платформы имеют возможность совершать возвратно-поступательное действие. С помощью привода нагружения 9 верхняя платформа прижимается к нижней до образования контакта между образцами. Затем через привод циклического возвратно-поступательного действия 8 нижняя платформа приводится в движение. За счет сил трения верхняя платформа будет повторять движения нижней платформы с меньшей амплитудой. Эти движения регистрируются датчиками линейных перемещений 2, а данные, поступающие на компьютер, являются входом и выходом динамической системы фрикционного взаимодействия [5, 6].

Сравнение конструкций приборов. В первую очередь изменения коснулись *двигателей*. В версии Трибал-2 используется электродвигатель постоянного тока (24В VEB ElmoHartha DDR Typ1223.3), который приводит в движение нижнюю платформу с помощью кривошипно-ползунного механизма [7]. Такой двигательный узел вносит дополнительный колебательный шум в регистрируемые данные, что приводит к повышению погрешности.

В машине трения Трибал-Т используется мотор-редуктор IG-22С (IG22C001840151R фирмы „Электропривод“, ГОСТ 31591-2012), что позволило исключить вышеуказанные недостатки.

Следующее изменение внесено в **измерительный блок**. В версии Трибал-2 для снятия механических характеристик используются щупы, которые передают сигнал от платформ на датчики перемещения (датчики-индикаторы часового типа, ГОСТ 577-68). В машине трения Трибал-Т используются высокоточные датчики линейных перемещений (модель GGD19P32C-10 фирмы „UtmostElectronics“), что позволило повысить точность измерений.

Произведена замена **направляющих** для перемещения платформ. В машине трения Трибал-2 в качестве направляющих использовались металлические бруски с канавками, на которые устанавливались платформы через закрепленные на них подшипники. В установке Трибал-Т используются прецизионные направляющие [8] с подшипниковой дорожкой из перекрестных роликов, что позволило повысить точность и уровень прилагаемых нагрузок, а также уменьшить влияние вибраций.

Помимо улучшения конструкции, изменения коснулись и самих **образцов**. В устройстве Трибал-2 пары трения имели форму параллелепипеда и размещались по центру подвижных платформ. Из-за этого возникали ошибки, связанные с сохранением плоскостности пары трения. В устройстве Трибал-Т эта проблема была решена за счет использования трехточечной системы контакта.

Сравнительный анализ результатов. На машинах трения Трибал-2 и Трибал-Т была проведена серия экспериментов при различных условиях и разных парах трения. Далее приведены результаты и анализ полученных данных трибопар Сталь — Сталь.

На рис. 2, *а* — Трибал-2, *б* — Трибал-Т, представлены зависимости входных и выходных сигналов, характеризующих взаимное перемещение верхних и нижних образцов трения в начальный момент времени проведения эксперимента (по оси ординат отложены данные измерительных устройств (*A*)). Графики, полученные с помощью функции plot и обработанные с использованием SignalProcessingToolbox (см. [9—12]), демонстрируют изменения амплитуды и величины запаздывания между входным и выходным сигналами. Входной сигнал имеет большую амплитуду по сравнению с выходным, это обуславливается рассеянием энергии при передаче действия от нижней платформы к верхней. Для устройства Трибал-2 характерны наличие „плато“ (примерно равные ординаты на некотором участке времени) в области пиков и ступенчатые переходы между пиками, что приводит к повышению погрешности. Такой вид сигнала обусловлен, как уже упоминалось, недостатками конструкции, использованием кривошипно-ползунного механизма, присоединенного к электродвигателю, и датчиков-индикаторов часового типа, которые характеризуются инертностью, а также малой точностью позиционирования линейных направляющих (непосредственно на которых и размещаются образцы).

Предпринятая модернизация устройства позволила устранить вышеуказанные недостатки и тем самым повысить точность и динамический диапазон измерений; поэтому на графике вход/выход для устройства Трибал-Т (см. рис. 2, *б*) форма сигналов существенно изменилась.

На рис. 2 представлены также диаграммы зависимости выход/вход, образованные непрерывной кривой. Данные диаграммы характеризуют работу установки и в идеальном варианте должны представлять овал и повторяться (сливаться) от цикла к циклу. Из-за технического несовершенства цикловая диаграмма устройства Трибал-2 имеет более значительный разброс площади по сравнению с Трибал-Т.

Чтобы определить разброс цикловой диаграммы, решено разбить ее на равные участки, а именно на циклы, и произвести расчет площадей диаграмм. Оценка разброса площадей по каждому участку (циклу) является мерой точности установок.

Расчет площадей осуществляется при разбиении их на треугольники и последовательном применении формулы Герона для оценки всей площади. Число циклов определяет, с точки зрения математической статистики, выборку рассчитанных площадей.

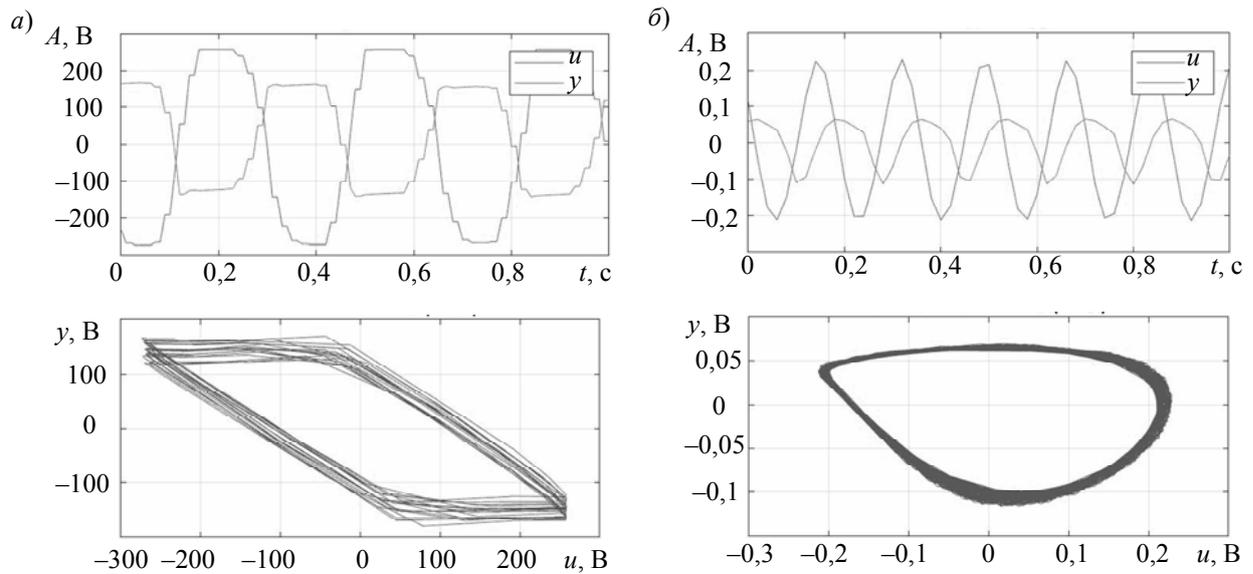


Рис. 2

Расчет отклонений проводится следующим образом. Сначала рассчитывается средняя площадь

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i,$$

где S_i — площадь одной диаграммы, n — количество циклов.

Далее осуществляется переход к безразмерным величинам

$$Q_i = \frac{S_i}{\bar{S}} - 1$$

и определяется среднее значение безразмерной величины

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i.$$

Количественные оценки изменчивости контуров диаграмм для каждого из устройств выбраны в качестве меры их точности. Оценкой изменчивости являются выборочные средние и дисперсии поцикловой разности площадей диаграмм. Переход к безразмерным величинам обеспечил возможность сравнения этих оценок для Трибал-2 и Трибал-Т. Для последующего определения доверительных границ выборочных оценок был последовательно использован аппарат распределения статистик. На рис. 3 приведены графики, отражающие проверку распределения для двух устройств (a — Трибал-2, b — Трибал-Т) с помощью функции, обратной функции нормального распределения.

Далее определялись стандартное отклонение нормального распределения (δ), а также нижние (BCI) и верхние (TCI) доверительные интервалы (d) стандартных отклонений [13—15]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2};$$

$$BCI = \sqrt{\frac{(n-1)\delta^2}{\chi_B^2}}, \quad TCI = \sqrt{\frac{(n-1)\delta^2}{\chi_T^2}},$$

где χ — хи-квадрат распределение.

В таблице приведены рассчитанные характеристики трибологических пар в ходе экспериментов на установках Трибал-2 и Трибал-Т. На рис. 4 (оценка распределения) представлено графическое отображение таблицы. Как следует из приведенных данных, 95 %-ная оценка

доверительного интервала обуславливает достаточно большой интервал для стандартного отклонения. Таким образом, на основании полученных результатов мерой точности устройств Трибал-Т и Трибал-2 являются доверительные интервалы стандартных отклонений, что позволяет использовать их в качестве технических характеристик машин трения возвратно-поступательного действия. В дальнейшем этот метод можно применять для метрологической поверки подобных устройств.

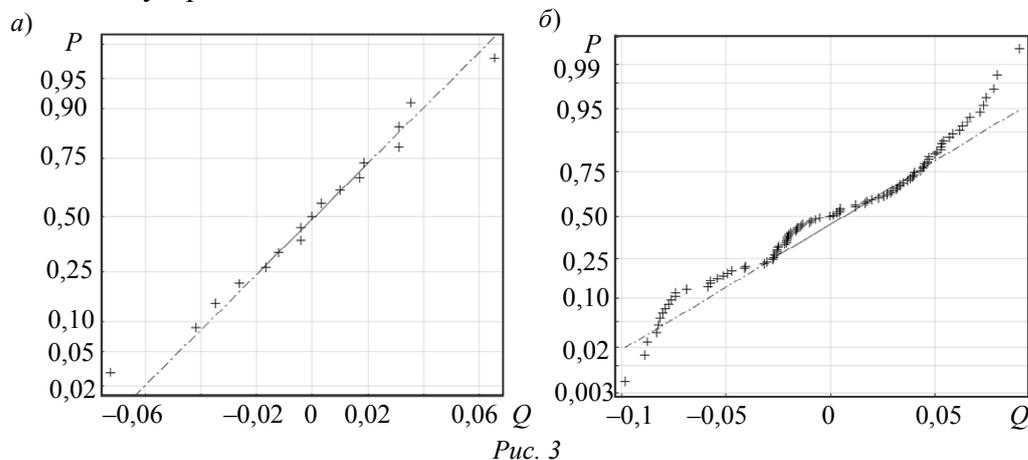


Рис. 3

Машина трения	δ	ТСИ	ВСИ	d
Трибал-Т	0,048	0,056	0,042	0,014
Трибал-2	0,033	0,125	0,061	0,064

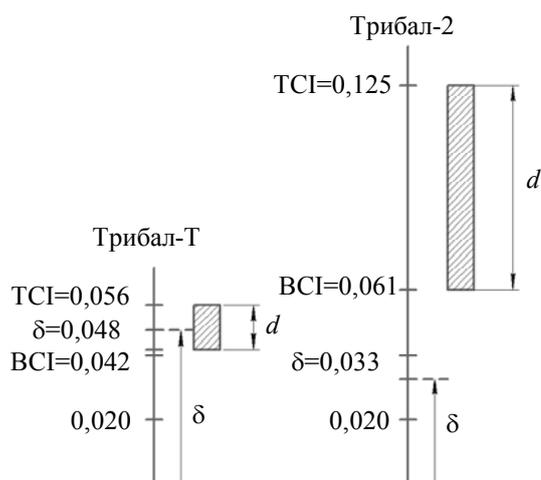


Рис. 4

Заключение. Приведена сравнительная оценка двух поколений машин трения для передачи движения посредством фрикционного взаимодействия. В ходе исследования доказано повышение точности на один порядок в устройстве нового поколения Трибал-Т. Предложенный метод оценок точностных характеристик машин трения показал свою эффективность.

К направлениям перспективных исследований относятся задача использования запаздывания выходных данных принудительно перемещающегося образца и разработка корректной модели процесса фрикционного взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1821689 РФ. Устройство для испытания материалов на трение / В. М. Мусалимов. 1993.
2. Пат. 2289119 РФ. Устройство для испытания материалов на трение / В. М. Мусалимов. 2006.
3. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: Ун-т ИТМО, 2006. 191 с.

4. Пат. 2600080 РФ. Устройство для исследования триботехнических характеристик материалов / В. М. Мусалимов. 2016.
5. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
6. Мусалимов В. М., Калапышина И. И., Нуждин К. А. Идентификация динамических систем фрикционного взаимодействия (MatLab): Учеб. пособие. СПб: Ун-т ИТМО, 2017. 143 с.
7. Латинский М. А. Короткоходный двигатель Конда — Кун. М.: Сов. энциклопедия, 1973. Т. 13.
8. Стандартные координатные столы. SKFGroup 2011, PUB 4183/1 ENApril 2011 [Электронный ресурс]: <<http://www.lmotion.ru/guidstandard.shtml>>.
9. 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.
10. Коротков В. П., Тайц Б. А. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств. М.: Изд-во стандартов, 1978. 352 с.
11. Rein L., Olev M. An Introduction to Metrology. Tallinn: TUT Press, 2011. P. 283.
12. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: Питер, 2002. 608 с.
13. Мещеряков В. В. Задачи по статистике и регрессионному анализу с MatLab. М.: Диалог-МИФИ, 2009. 448 с.
14. Лагутин М. В. Наглядная математическая статистика. М.: БИНОМ, 2007. 472 с.
15. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 464 с.

Сведения об авторах

- Роман Владимирович Печенко** — аспирант; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: pechenko_gv@mail.ru
- Кирилл Андреевич Нуждин** — аспирант; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: kirill_nuzhdin@corp.ifmo.ru
- Михаил Владимирович Абрамчук** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; преподаватель; E-mail: abramchukmv@corp.ifmo.ru
- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; факультет систем управления и робототехники; E-mail: musvm@ya.ru

Поступила в редакцию
28.02.19 г.

Ссылка для цитирования: 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.

ACCURACY CHARACTERISTICS OF FRICTION MACHINES OF RECIPROCAL ACTION

R. V. Pechenko, K. A. Nuzhdin, M. V. Abramchuk, V. M. Musalimov

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

Friction machines under consideration has a distinctive feature of implementation of forced movement of studied samples relative to each other due to force action transfer by friction. Analysis of evolution of structural components of the machines allowed to increase the accuracy characteristics of designed and developed friction machines by virtue of application of high-technology drives, precision guides, displacement sensors, as well as optimization of tribopair position. An original approach to comparing the errors of the machines of two design variants is proposed. The approach is based on the use of cyclic input-output diagrams for estimating the areas formed by the machines. Results of comparative analysis of qualitative characteristics and relative errors of the devices are presented.

Keywords: Tribal, reciprocal action, construction, signal processing algorithm, accuracy assessment

REFERENCES

1. Certificate of authorship 1821689 RU, *Ustroystvo dlya ispytaniya materialov na treniye* (Device for Testing Materials for Friction), V.M. Musalimov, 1993. (in Russ.)

2. Patent 2289119 RU, *Ustroystvo dlya ispytaniya materialov na treniye* (Device for Testing Materials for Friction), V.M. Musalimov, Published 2006. (in Russ.)
3. Musalimov V.M., Valetov V.A. *Dinamika friktsionnogo vzaimodeystviya* (Dynamics of Frictional Interaction), St. Petersburg, 2006, 191 p. (in Russ.)
4. Patent 2600080 RU, *Ustroystvo dlya issledovaniya tribotekhnicheskikh kharakteristik materialov* (Device for the Study of the Tribotechnical Characteristics of Materials), V.M. Musalimov, Published 2016. (in Russ.)
5. Johnson K.L. *Contact mechanics*, Cambridge University Press, 1987, 452 p.
6. Musalimov V.M., Kalapyshina I.I., Nuzhdin K.A. *Identifikatsiya dinamicheskikh sistem friktsionnogo vzaimodeystviya (MatLab)* (Identification of Dynamic Friction Interaction Systems (MatLab)), St. Petersburg, 2017, 143 p. (in Russ.)
7. Latinskiy M.A. *Korotkikhodnyy dvigatel' Konda–Kun* (Short-Stroke Konda Kuhn Engine), Moscow, 1973, vol. 13. (in Russ.)
8. <http://www.lmotion.ru/guidstandard.shtml>. (in Russ.)
9. Musalimov V.M., Nuzhdin K.A. *Journal of Friction and Wear*, 2019, no. 1(40), pp. 68–76. (in Russ.)
10. Korotkov V.P., Tayts B.A. *Osnovy metrologii i teorii tochnosti izmeritel'nykh ustroystv* (Fundamentals of Metrology and Theory of Measuring Device Accuracy), Moscow, 1978, 352 p. (in Russ.)
11. Rein L., Olev M. *An Introduction to Metrology*, Tallinn, TUT Press, 2011, 283 p.
12. Sergiyenko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Digital Signal Processing), St. Petersburg, 2002, 608 p. (in Russ.)
13. Meshcheryakov V.V. *Zadachi po statistike i regressionnomu analizu s MatLab* (Tasks on Statistics and Regression Analysis with MatLab), Moscow, 2009, 448 p. (in Russ.)
14. Lagutin M.V. *Naglyadnaya matematicheskaya statistika* (Visual Mathematical Statistics), Moscow, 2007, 472 p. (in Russ.)
15. Bendat J.S., Piersol A.G. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Wiley, 2010, 640 p. ISBN: 0470248777, 9780470248775

Data on authors

- | | |
|-----------------------------|--|
| Roman V. Pechenko | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: pechenko_rv@mail.ru |
| Kirill A. Nuzhdin | — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: kirill_nuzhdin@corp.ifmo.ru |
| Michail V. Abramchuk | — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Lecturer; E-mail: abramchukmv@corp.ifmo.ru |
| Viktor M. Musalimov | — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: musvm@ya.ru |

For citation: Pechenko R. V., Nuzhdin K. A., Abramchuk M. V., Musalimov V. M. Accuracy characteristics of friction machines of reciprocal action. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 5. P. 442–448 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-5-442-448