



- возбуждением // Вестник Машиностроения. 2016. – №5. – с. 27–32.
3. Пат. № 2604005 Рос. Федерация. Вибрационная измельчительная машина / А.В. Кошелев, А.А. Ермолаев. Бюл. № 34.
 4. Пат. № 2532235 Рос. Федерация. Вибрационная транспортирующая машина / В.И. Антипов, Р.И. Антипова, А.В. Кошелев, Н.Н. Денцов. Бюл. № 30.
 5. Шмидт Г. Параметрические колебания. М. : Мир, 1978. 336 с.
 6. Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. Теория колебаний. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 272с.
 7. Антипов В.И., Денцов Н.Н., Кошелев А.В. Динамика параметрически возбуждаемой вибрационной машины с изотропной упругой системой // Фундаментальные исследования. 2014. № 8. Ч. 5. С. 1037–1042.
 8. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М. : Наука, 1974. 504 с.
 9. Ланда П.С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М. : Наука, 1980. 360 с.
 10. Антипов В.И. Динамика вибрационных машин с параметрическим возбуждением // Автореф. ... д-ра. техн. наук. Нижний Новгород, Изд-во НГТУ, 2001. 38 с.
 11. Гончаревич И.Ф. Вибрация – нестандартный путь. М. : Наука, 1986. 209 с.
 12. Динамика машин и управление машинами : справочник / под ред. Крейнина Г.В. М. : Машиностроение, 1988. 239 с.
 13. Вибрация в технике : справочник. Т.4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела. М. : Машиностроение, 1981. 509 с.
 14. Гукенхеймер Дж., Холмс Ф. Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. Москва-Ижевск : ИКИ, 2002.
 15. Блехман И.И. Вибрационная механика. М. : Физматлит, 1994. 400 с.

УДК 66.023

Трутаев Станислав Юрьевич,
к. т. н., заведующий отделом инновационных разработок,
АО «ИркутскНИИХиммаш»,
тел. 8(3952)410-336, e-mail: stas@himmash.irk.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕМПИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ВЯЗКОГО ТРЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

S. Yu. Trutaev

MATHEMATICAL MODELING OF VISCOUS FRICTION DAMPER DEVICES ON THE BASIS OF THE BENCH TESTING RESULTS

Аннотация. Продемонстрированы разработки АО «ИркутскНИИХиммаш» в области создания демпфирующих устройств вязкого трения для обеспечения промышленной безопасности оборудования, эксплуатируемого в условиях интенсивных динамических воздействий. Отмечена возможность обеспечения промышленной безопасности динамически нагруженного оборудования на основе применения дискретных демпфирующих связей вязкого или сухого трения. Показана принципиальная конструкция разработанного и внедренного в промышленную эксплуатацию демпфирующего устройства вязкого трения мембранного типа, обладающего высокой чувствительностью к вибрациям малых амплитуд, а также возможностью варьирования демпфирующих свойств в широком диапазоне. Рассмотрены подходы к интерпретации работы реальных демпфирующих устройств вязкого трения с использованием обобщенных моделей Максвелла и Кельвина - Фойгта по результатам стендовых испытаний. В частности, показана возможность идентификации искомых параметров математической модели демпфирования на основе применения методов оптимального проектирования конструкций. При этом отмечена возможность использования в качестве минимизируемой целевой функции суммы квадратов невязок между экспериментально измеренной силой демпфирования и силой демпфирования, рассчитанной по принятой математической модели. Продемонстрировано разработанное специализированное программное обеспечение, реализующее решение задачи идентификации параметров моделей демпфирования для различного сочетания обобщенных моделей Кельвина - Фойгта и Максвелла с общим количеством целей до 10. При этом в качестве базового алгоритма поиска оптимума принят метод прямого сканирования по сетке с последовательным уменьшением зоны поиска.

Ключевые слова: опасный производственный объект, динамическое воздействие, вибрация, сейсмика, демпфирование, демпфер вязкого трения, метод конечных элементов, идентификация, модель Максвелла, модель Кельвина - Фойгта.

Abstract. The article presents the results of work of JSC "IrkutskNIHimmash" in the field of developing viscous friction dampers. They provide the industrial safety of equipment used under the intensive dynamic impact. The possibility of ensuring industrial safety of dynamically loaded equipment based on the use of discrete damping bonds of viscous or dry friction is noted. The principal design of a viscous friction damping device of membrane type developed and introduced into commercial operation, which has a high sensitivity to vibrations of small amplitudes, as well as the possibility of varying the damping properties in a wide range is shown. The approaches to interpretation of work of the real viscous friction damping devices based on the results of bench testing with the help of generalized Maxwell and Kelvin-Voigt models are considered in the article. In particular, the possibility of identification of the required parameters of damping mathematical model on the basis of the methods of structures optimal design is shown. Besides, it is noted that it is possible



to use the sum of squares of the difference between the experimentally measured damping force and the damping force calculated in accordance with the accepted mathematical model as a minimized target function. The article presents the developed application-dependent software that solves the problem of damping models parameters identification for different combinations of generalized Maxwell and Kelvin–Voigt models if the general amount of chains is less than 10. At that the method of direct net scanning followed by reduction of search area is accepted as the basic algorithm for search of the optimum.

Keywords: *divided rigid body, elastic element, friction, force of gravity, multibody mechanical systems, contact condition, contact interaction, unilateral constraints, static reaction, dynamic reaction, contact forces.*

Введение

В современной промышленности существует множество различных объектов, работающих в условиях интенсивных динамических воздействий, которые негативно отражаются на их техническом состоянии и эксплуатационных характеристиках. Так, на химических, нефтеперерабатывающих и других подобных производствах хорошо известны проблемы, связанные с высоким уровнем вибрации элементов насосно-компрессорного оборудования, в частности, трубопроводных систем, технологических аппаратов и т. д. Особенно это явление характерно для технологических установок, оснащенных поршневыми компрессорными машинами, в нагнетающих и всасывающих линиях которых имеет место пульсация давления большой амплитуды. Длительное действие повышенной вибрации на оборудование в сочетании с другими факторами становится причиной усталостного разрушения отдельных его элементов и, как следствие, приводит к выходу из строя самих компрессорных машин, трубопроводов, технологических аппаратов и т. д.

Помимо вибрационных воздействий, для технологического оборудования многих опасных производственных объектов (ОПО) Российской Федерации ситуация осложняется необходимостью учета дополнительных динамических нагрузок, обусловленных, например, сейсмическими явлениями (для технологических площадок, размещаемых в сейсмически активных районах), ветровыми нагрузками (для высотных колонных аппаратов, емкостей, дымовых труб) и т. д. С учетом того, что массоинерционные и жесткостные характеристики действующего оборудования могут существенно отличаться от проектных (например, вследствие ошибок монтажа, изменения технологии, изменения свойств грунтов оснований и т. п.), то и фактическая нагруженность таких объектов при действии динамических нагрузок может изменяться в широком диапазоне.

Как правило, защита оборудования новых технологических установок от динамических воздействий обеспечивается на этапе их проектирования. Именно на данном этапе предусматриваются необходимые конструктивные решения, повышающие динамическую устойчивость оборудова-

ния. Однако для установок, уже работающих на производствах не один десяток лет, вопросы повышения динамической устойчивости, вибро- и сейсмозащиты приходится решать в процессе эксплуатации. Необходимость реализации мероприятий по повышению динамической устойчивости оборудования устанавливается по результатам разового детального обследования его состояния с использованием многоканальной измерительной аппаратуры или длительного мониторинга сейсмических событий на площадке его размещения [1].

Подходы к обеспечению промышленной безопасности динамически нагруженного оборудования

Как показывает многолетний опыт АО «ИркутскНИИхиммаш» в сфере обеспечения промышленной безопасности динамически нагруженного оборудования, одним из наиболее эффективных методов снижения динамических нагрузок на промышленное оборудование является метод, основанный на применении специальных демпфирующих устройств (ДУ), таких, например, как демпферы вязкого или сухого трения. Подобная технология компенсации нежелательных динамических воздействий широко применяется в объектах транспорта, атомной энергетике, аэрокосмической технике и других высокотехнологичных областях [2-4]. Так, в ряде опубликованных работ [5, 6], посвященных исследованию влияния демпфирования на вынужденные колебания промышленного оборудования и, в частности, на динамику трубопроводных систем, показано, что введение в исходную систему оптимально подобранных ДУ позволяет в несколько раз снизить динамические нагрузки на оборудование и в значительной степени продлить ресурс его безопасной эксплуатации. Так, например, при сопряжении распложенных рядом вертикально стоящих промышленных холодильников поршневых компрессоров в верхнем уровне посредством системы вязких демпферов удается снизить их вибрационные перемещения в 2-2,5 раза [7].

К сожалению, в России подобные технологии защиты промышленного оборудования применяются достаточно редко, что связано с отсутствием необходимой нормативно-правовой базы, отработанных универсальных и технологичных



конструктивных решений, а также высокой стоимостью импортных ДУ. С учетом этого в последние годы АО «ИркутскНИИхиммаш» реализует ряд проектов, связанных с разработкой новых технологичных и эффективных систем виброзащиты промышленного оборудования. В распоряжении института имеются значительные производственные мощности, а также обширная экспериментальная база, позволяющие не только изготавливать конструкции, но и проводить ресурсные, прочностные и вибрационные испытания изготавливаемой продукции.

На сегодняшний день Институт уже имеет положительный опыт внедрения в промышленную эксплуатацию некоторых образцов систем пассивной и полупассивной систем виброизоляции и планирует запуск в мелкосерийное производство наиболее эффективных систем. Ведутся разработки систем виброзащиты с использованием управляемых демпферов [8, 9]. Так, разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию серия ДУ вязкого трения мембранного типа с постоянным (серия МД) и регулируемым (серия МДР) уровнем демпфирования. Основным достоинством данных демпферов является эффективное гашение вынужденных колебаний в широком спектре частот внешнего воздействия. Отличительной чертой указанных устройств является высокая чувствительность к вибрациям малых амплитуд, а также возможность варьирования демпфирующих свойств в широком диапазоне.

Конструктивно демпфер вязкого трения серии представляет собой двухкамерный цилиндр, заполненный вязкой жидкостью (рис. 1).

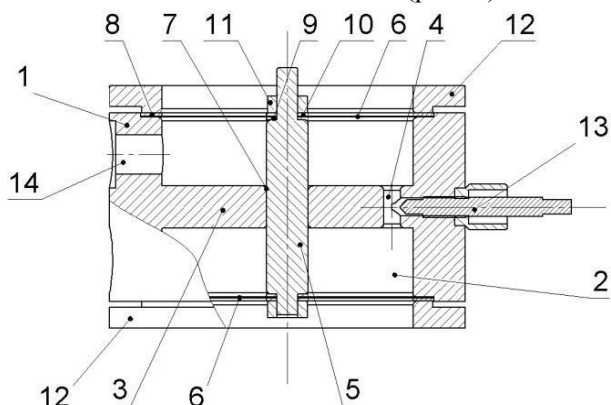


Рис. 1. Принципиальная конструкция ДУ вязкого трения мембранного типа:

1 – корпус; 2 – рабочее тело; 3 – перегородка; 4 – перепускной канал; 5 – шток; 6 – пакет мембран; 7 – отверстие в перегородке; 8 – прокладка корпуса; 9 – прокладка штока; 10 – шайба; 11 – гайка; 12 – фланец; 13 – перепускной вентиль; 14 – заливочное отверстие

Гашение колебаний защищаемого объекта достигается за счет вытеснения лишнего объема жидкости сквозь малые отверстия, размещаемые в теле перегородки, разделяющей камеры. Объем вытесняемой жидкости определяется степенью деформации мембраны, герметично соединенной со штоком, который с одной стороны крепится к защищаемому объекту, а с другой – к компенсационной мембране.

Основополагающим моментом, позволяющим применять те или иные ДУ в задачах вибро- и сейсмозащиты, является возможность математического моделирования поведения демпферов с учетом их фактических характеристик [10 -13]. Именно математическое моделирование позволяет расчетным путем оценить эффективность применяемого демпфера, а в случае необходимости – обеспечить подбор требуемого демпфера для конкретных условий эксплуатации [6]. Так, например, работа рассмотренных в [3, 4] ДУ вязкого трения на основе высоковязких силиконов (полидиметилсилоксанов) может быть аппроксимирована математической моделью, представленной двойной цепью Максвелла (рис. 2).

Как было отмечено выше, идентификация параметров математической модели демпфирования осуществляется с использованием методов оптимального проектирования конструкций. При этом задача оптимизации выглядит следующим образом:

найти вектор переменных проектирования

$$X(x_1, x_2, \dots, x_m),$$

доставляющий минимум целевой функции

$$\min W(X),$$

где $X(x_1, x_2, \dots, x_m)$ – вектор переменных задачи оптимизации, включающий в себя параметры математической модели (например, для модели демпфирования, включающей в себя две цепи Максвелла (рис. 2), математическая модель ДУ будет характеризоваться четырьмя параметрами k_1, k_2, c_1, c_2);

$W(X)$ – минимизируемая целевая функция, представляющая собой сумму квадратов невязок между экспериментально измеренной силой демпфирования $f_{exp}(t)$ и силой демпфирования, рассчитанной по принятой математической модели $f(X, t)$:

$$W = \int_0^t (f_{exp}(t) - f_{exp}(X, t))^2 \rightarrow \min,$$

где t – время испытания ДУ.

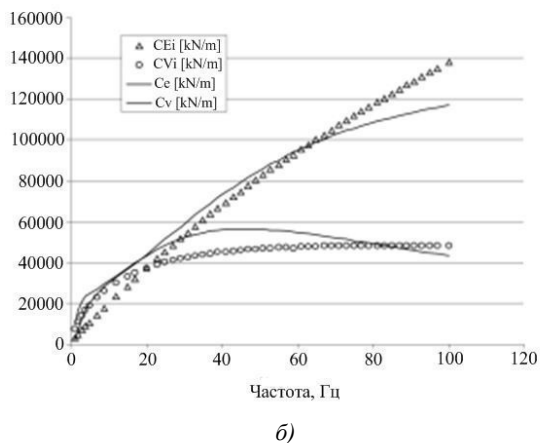
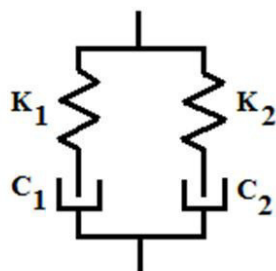
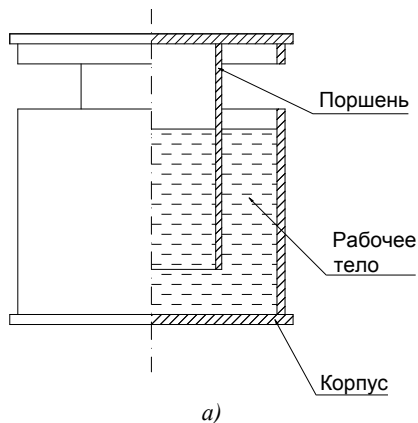
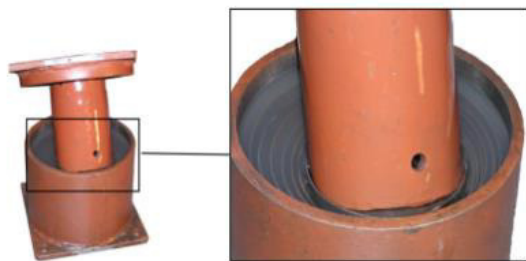


Рис. 2. Моделирование характеристик демпферов вязкого трения [2, 3]: а) вязкий демпфер серии ВД; б) аппроксимация характеристик демпфера двойной цепью Максвелла

Для реализации процедуры идентификации параметров математических моделей ДУ в АО «ИркутскНИИХиммаш» разработано специализированное программное обеспечение Stand, применяемое при испытании машиностроитель-

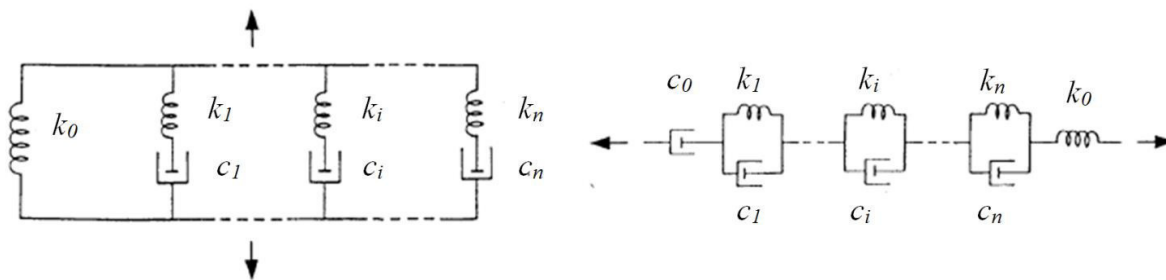
ных изделий в стендовых условиях. На указанное программное обеспечение получено свидетельство о регистрации программ для ЭВМ [16] (№ 2016662397 «Программа для стендовых испытаний машиностроительных изделий»). Указанное программное обеспечение позволяет реализовать решение рассмотренной выше задачи оптимизации для различного сочетания обобщенных моделей Кельвина - Фойгта и Максвелла (рис. 3) с общим количеством цепей до 10. Сама процедура поиска осуществляется методом прямого сканирования по сетке с последовательным уменьшением зоны поиска [17, 18].

Для реализации процедуры идентификации параметров математических моделей ДУ в АО «ИркутскНИИХиммаш» разработано специализированное программное обеспечение Stand, применяемое при испытании машиностроительных изделий в стендовых условиях.

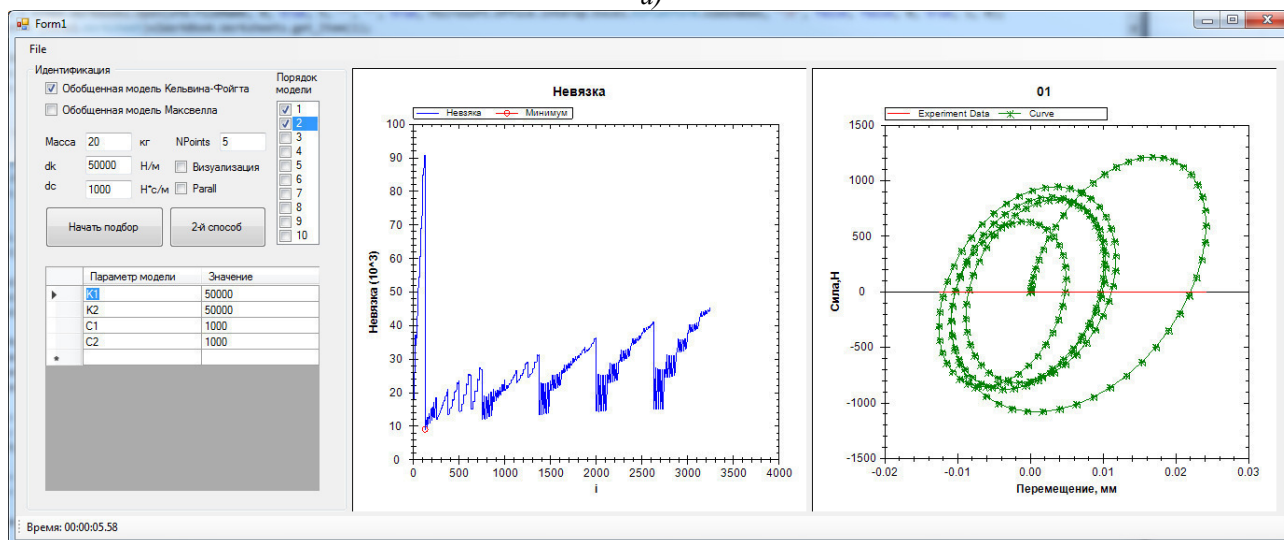
На указанное программное обеспечение получено свидетельство о регистрации программ для ЭВМ [16] (№2016662397 «Программа для стендовых испытаний машиностроительных изделий»). Указанное программное обеспечение позволяет реализовать решение рассмотренной выше задачи оптимизации для различного сочетания обобщенных моделей Кельвина-Фойгта и Максвелла (рис. 3) с общим количеством цепей до 10. Сама процедура поиска осуществляется методом прямого сканирования по сетке с последовательным уменьшением зоны поиска [17, 18].

Заключение

В рамках реализации технологии обеспечения промышленной безопасности динамически нагруженного оборудования в АО «ИркутскНИИХиммаш» разработаны способы и средства управления динамическими свойствами механических колебательных систем на основе введения в них дополнительных демпфирующих связей и оптимизации степени демпфирования. В частности, разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию серия ДУ вязкого трения мембранного типа с постоянным и регулируемым уровнем демпфирования, позволяющих обеспечивать эффективное гашение вынужденных колебаний защищаемого объекта в широком спектре частот внешнего воздействия. Для обеспечения возможности расчетного исследования колебательных систем с демпфированием разработаны подходы и программные средства, обеспечивающие идентификацию параметров математических моделей демпфирования для наилучшей аппроксимации характеристик реальных ДУ по результатам стендовых испытаний.



а)



б)

Рис. 3. Разработанное ПО для идентификации параметров математических моделей для описания характеристик ДУ вязкого трения: а) реализуемые обобщенные модели демпфирования; б) пример интерфейсной части программы идентификации

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- СТО-00220227-044-2016. Оборудование опасных производственных объектов. Расчетно-экспериментальные методы исследования. Введ. 01.09.2016. Иркутск : ИркутскНИИхиммаш, 2016. 52 с.
- Barutzki, F. Extending the Service Life of Piping Systems Through the Application of Viscous Fluid Dampers. GERB Vibrations Control Systems, Inc., 2002.
- V.V. Kostarev, D.J.Pavlov. Application of SKTI Damper for Protecting Piping Systems, Equipment and Structures Against Dynamic and Seismic Response. SMIRT 11 Transactions, Vol. K, Tokyo, Japan, 1991, p.p. 505–510.
- ТО 4192-001-20503039-03. Вязкоупругие демпферы серии ВД. Техническое описание. СПб. : ЦКТИ Вибросейсм, 2003. 45 с.
- Трутаев С.Ю. Исследование вынужденных колебаний трубопроводных систем с дискретными демпферами // Вестник ИргТУ. Иркутск : Изд-во ИргТУ, № 4. 2004 С. 178.
- Бездедев В.В., Трутаев С.Ю. Оптимизация демпфирующих свойств опорных конструкций при разработке мероприятий по снижению вибрации трубопроводов насосно-компрессорного оборудования // V Междунар. симпозиум по трибофатике ISTF-2005 : сб. докл. Т. 3. Иркутск : изд-во ИргУПС, 2005. С. 65–70.
- Пат. 2343313 Рос. Федерация. Компрессорная станция / С. Ю. Трутаев и др. ; заявитель и патентообладатель ОАО ИркутскНИИхиммаш. №2007111091/06 ; заявл. 26.03.2007; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1. 7 с.
- Трутаев С.Ю., Трутаева В.В. Разработка и внедрение эффективных систем вибро- и сейсмозащиты промышленного оборудования // Исследования, проектирование, изготовление, стандартизация и техническая диагностика оборудования и трубопроводов, работающих под давлением : материалы IX науч.-техн. конф. Иркутск, 2011. С.124–126.
- Трутаев С.Ю. Управление динамическим состоянием промышленного оборудования на основе разработки и внедрения эффективных



- средств виброзащиты // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3 (31). С. 81–84.
10. Lewandowski R., Chorążyczewski B. Identification of the parameters of the Kelvin–Voigt and the Maxwell fractional models, used to modeling of viscoelastic dampers // Computers & structures. 2010. Vol. 88 (1). P. 1–17.
 11. Park S. V. Analytical modeling of viscoelastic dampers for structural and vibration control // International Journal of Solids and Structures. 2001. Vol. 38 (44–45). P. 8065–8092.
 12. Study on Piecewise Linear Model of Anti - yaw Damper and Test Analysis/D. Yang [et al.]/International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference (IIIEEC 2015). 2015. P.1179–1184.
 13. Параметрическая идентификация математической модели вязкоупругих материалов с использованием производных дробного порядка / С. В. Ерохин и др. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2015. Т. 11., № 3. С.82–85.
 14. Безделев В.В. Буклемишев А.В. Программная система COMPASS. Руководство пользователя Иркутск : Иркут. гос. техн. ун-т, 2000. 120 с.
 15. Компьютерная система COMPASS и ее применение в расчетах объектов химического машиностроения / В.В. Безделев и др. // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. 1998. № 3. С. 128–134.
 16. Программа для стендовых испытаний машиностроительных изделий (Stand) : свидетельство № 016662397 Рос. Федерация / С. Ю. Трутаев, Н. А. Верховин ; заявитель и патентообладатель АО ИркутскНИИХиммаш. № 2016619756 ; заявл. 16.09.2016; зарегистр. 09.11.2016. 1 с.
 17. Малков В.П. Угодчиков А.Г. Оптимизация упругих систем. М. : Наука, 1981. 288 с.
 18. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. М. : Наука, 1979. 352 с.

УДК 62-25

Линейцев Владимир Юрьевич,
к. т. н., доцент кафедры «Строительство железных дорог», Забайкальский институт
железнодорожного транспорта, Чита,
тел. 8 (914) 492-5894, e-mail: Linetzev@mail.ru

Ильиних Виктор Анатольевич,
к. т. н., доцент кафедры «Научно-инженерные дисциплины»,
Забайкальский институт железнодорожного транспорта, Чита,
тел. 8 (924) 472-8846, e-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

УЧЕТ ИЗНОСА ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СБОРКИ РК-3 ПРОФИЛЬНЫХ КОНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

V. Yu. Lineyev, V. A. Il'inykh

WEAR ACCOUNTING IN SIMULATION MODELING OF ASSEMBLY OF PG-3 PROFILE CONICAL COMPOUNDS

Аннотация. В статье предложена математическая модель износа контактирующих поверхностей и на ее основе проведен анализ влияния износа поверхности вала при сборке РК-3 профильных конических соединений деталей машин. Всего проведено 30 реализаций сборки РК-3 профильного конического соединения с учетом последовательного износа, когда координаты исходной шероховатой поверхности вала изменяются под влиянием износа от реализации к реализации. Проведение последовательных имитационных расчетов сборки конического соединения измеряет конечные параметры сформированного сопряжения конических деталей. Показано, что при моделировании последовательного износа отчетливо просматриваются этапы приработки соединения и его нормальная эксплуатация как по параметрам положения вала в отверстии втулки (изменение положения центра масс вала и углов отклонения осей вала в системе координат отверстия), так и по параметрам контактирующих поверхностей (количество контактных точек, величины натягов и зазоров, относительная площадь контакта и контактные давления). Установлено, что основной процесс износа контактирующих поверхностей происходит именно в процессе сборки самого конического соединения и мало связан с его работой под действием внешней нагрузки по причине зависимости износной модели прежде всего от линейных скоростей скольжения в контактных точках сопрягаемых поверхностей. Сделан вывод о правильных внутренних связях между разработанными математическими моделями. Их применение позволит более подробно проанализировать взаимодействие контактирующих поверхностей деталей РК-3 профильного конического соединения.

Ключевые слова: РК-3 профиль, имитационное моделирование, механические системы.

Abstract. The article presents a mathematical model of the wear of the contacting surfaces and on its basis the influence of the wear of the shaft surface during assembling PG-3 profile conical compounds of machine parts. A total of 30 assembling realizations of PG-3 profile conical compound with due regard for consistent wear when the coordinates of the original rough surface of the shaft will be affected by the wear from implementation to implementation. Conducting consecutive simulation calculations of the conical compound assembly changes the final parameters of the formed conical details. It is shown that during the simulation of sequential wear stages of burnishing compound and its normal operation as the position of the shaft in the bushing hole (changing the position of the center of mass of the shaft and deflection angles of the shaft axes in the coordinate system of the hole), and the parameters of the contacting surfaces (the number of contact points, magnitude of tightness and gaps, the relative contact area and contact pressure) are well