

АНАЛИЗ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ СИЛЬФОННЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А. С. Козлов, Р. Я. ЛАБКОВСКАЯ, О. И. ПИРОЖНИКОВА, В. Л. ТКАЛИЧ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: labkovskaya@mail.ifmo.ru*

Рассмотрен метод исследования затухающих колебаний в оболочке сильфона при наличии внутреннего трения. В качестве меры внутреннего трения при статическом и динамическом нагружении взят логарифмический декремент колебаний. Описаны принципы работы созданного авторами автоматизированного комплекса для исследования внутреннего трения сильфонных чувствительных элементов устройств систем управления, обеспечивающего выпуск конкурентоспособных и высоконадежных сильфонных чувствительных элементов. Комплекс содержит установку, исследующую относительное рассеяние в условиях динамического нагружения сильфонных чувствительных элементов; установку, позволяющую определять возможность рассеяния энергии сильфонным чувствительным элементом в условиях вибрации; установку, определяющую рассеяние энергии в условиях циклического нагружения сильфона; установку, позволяющую исследовать демфирующие свойства материала сильфонного чувствительного элемента в условиях поперечных колебаний при нагружении данных элементов статической растягивающей силой. Комплекс также оснащен установкой для исследования демпфирующих свойств материалов сильфонных чувствительных элементов методом затухающих колебаний и методом резонансной впадины.

Ключевые *сильфонные чувствительные элементы, вязкое трение, логарифмический декремент, внутреннее трение, рассеяние энергии*

Затухание колебаний в сильфонных чувствительных элементах (СЧЭ) вызвано потерями энергии, связанными с наличием внешнего или внутреннего трения. Это трение обусловлено диффузионными процессами, протекающими в самом материале исследуемого объекта. Затухание колебаний также связано с изменением свойств металлов при изменении параметров температуры и времени [1—4].

Внутреннее трение проявляется в уменьшении амплитуды свободных колебаний, возникающих в материале СЧЭ при воздействии давления, изгибающего момента, а также осевой или поперечной силы [5—7].

Учет внутреннего трения в динамических расчетах подробно рассмотрен в работах В. В. Давыдова [8], вопросам частотной и температурной зависимости внутреннего трения посвящены труды Е. С. Сорокина [9]. В ряде датчиков давления, используемых в ракетостроении, необходимо учитывать именно температурную зависимость внутреннего трения, которое можно оценивать логарифмическим декрементом колебаний $\delta = \ln(A_n / A_{n+1})$, где

A_n и A_{n+1} — амплитуды соседних колебаний. Закон изменения амплитуды A с течением времени t имеет вид [6—10]:

$$A = A_0 e^{-t/\tau},$$

где τ — время релаксации.

Уменьшение амплитуды связано с потерями энергии, вызванными процессами релаксации в материале СЧЭ.

Для измерения затухания, вызванного внутренним трением материала СЧЭ, необходимо знать соотношение напряжения σ и деформации ε . Мера внутреннего трения определяется тангенсом угла сдвига фаз между напряжением и деформацией φ . Для СЧЭ диаграмма $\sigma = f(\varepsilon)$ представляет собой петлю гистерезиса, площадь ΔW которой характеризует меру потери энергии в процессе колебания.

Гистерезис сильфонов является незначительным (отклонение от линейности для сильфонов, материал которых относится к дисперсионно-твердеющим сплавам, составляет 0,5—1 %, для сильфонов из нержавеющей стали — 2—4 %). Значение φ связано с относительным рассеянием энергии ψ соотношением $\psi = 2\pi \operatorname{tg} \varphi$ [11]. Измерительные сильфоны изготавливаются в основном из дисперсионно-твердеющих сплавов 36НХТЮ, БрБ2, из нержавеющей сталей 12Х18Н9Т и 08Х18Н10Т и полутомпака Л80. Коэффициент трения (коэффициент поглощения) последнего лежит в диапазоне 0,06—0,15, т.е. является незначительным, следовательно, учет внутреннего трения неактуален, тогда как коэффициент поглощения полимерных материалов, используемых в последнее время при изготовлении сильфонов специального назначения с помощью 3D-технологий, может достигать 0,3, что уже говорит о необходимости учета этого факта при расчете вязкого трения.

Экспериментально относительное рассеяние возможно исследовать как при статическом, так и при динамическом нагружении [12]. Авторами статьи разработан автоматизированный комплекс для исследования внутреннего трения СЧЭ, включающий пять испытательных установок.

Статическое нагружение СЧЭ обеспечивается переменным весом гирь. Далее с учетом конкретного материала сильфона строится петля гистерезиса. При делении величины площади петли гистерезиса ΔW на величину работы деформации W определяют значение относительного рассеяния ψ .

Установка для исследования относительного рассеяния в условиях динамического нагружения СЧЭ позволила рассчитать рассеяние в случае динамического нагружения по затуханию крутильных колебаний, возбуждаемым в СЧЭ.

После обработки полученной диаграммы вычислялся логарифмический декремент колебаний [11—14]:

$$\delta = \ln(A_n / A_{n+1}),$$

где A_n и A_{n+1} — амплитуды соседних колебаний.

При малых значениях δ , что справедливо для СЧЭ, получаем [11, 14, 15]:

$$\delta = \Delta A / A = \Delta W / (2W) = \psi / 2,$$

где ΔA — изменение амплитуды колебаний в течение одного цикла;

$$\Delta W = \pi M_1 A \sin \varphi, \quad W = A^2 / (2\beta),$$

β — податливость образца.

В разработанный испытательный комплекс входит установка, создающая крутильные колебания в СЧЭ, позволяющая рассчитать рассеяние энергии при вибрации. Амплитуда крутильных колебаний в испытательном комплексе определяется оптическим методом.

Автоматизированный испытательный комплекс [16] также содержит установку, предназначенную для исследования рассеяния энергии в случае циклического деформирования

материала в условиях низких и высоких температур. Продольные и крутильные колебания образца возбуждались одним электромагнитным возбудителем.

СЧЭ нагревали трубчатым молибденовым нагревателем, введенным внутрь образца сильфона. При испытаниях в условиях низких температур использовался холодильник, внутри которого прогонялся жидкий азот.

Установка для исследования демпфирующих свойств материалов СЧЭ [17] в условиях поперечных колебаний образца, нагруженного статической растягивающей силой, также включена в испытательный комплекс. При создании модернизированной установки обеспечен минимум возможных потерь энергии в силовой цепи нагружения при колебаниях СЧЭ. Частота возбуждения задается через реле генератором колебаний. Регистрация колебаний при этом осуществляется с помощью тензорезисторов. Свободные колебания СЧЭ обусловлены срывом возбуждения резонансных колебаний заданной амплитуды с помощью реле, управляемого контактором шлейфового осциллографа [18, 19]. Использование установки для исследования демпфирующих свойств материала СЧЭ позволило также проводить анализ методом затухающих колебаний и методом резонансной впадины [11, 15].

Схемы вышеперечисленных установок приведены в работах [10, 11]. Предложенный в настоящей работе метод расчета обеспечивает учет всех необходимых зависимостей вязкого трения и коэффициента поглощения материала, что определяет корректность полученных результатов и их соответствие экспериментальным данным.

Таким образом, разработанный комплекс для исследования внутреннего трения и процессов рассеяния энергии при статическом и динамическом нагружении СЧЭ позволяет обеспечить проведение испытаний, гарантирующих выпуск высоконадежной сильфонной элементной базы устройств систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева Л. Е., Беседа А. И., Богданова Ю. А. Сильфоны. Расчет и проектирование. М.: Машиностроение, 1975. 156 с.
2. Вольмир А. С., Куранов Б. А., Турбаивский А. Т. Статика и динамика сложных структур (Прикладные многоуровневые методы исследований). М.: Машиностроение, 1989. 248 с.
3. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
4. Корсунов В. П. Упругие чувствительные элементы (статика, динамика, надежность). Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1980. 320 с.
5. Лабковская Р. Я., Лысов А. Л., Коробейников А. Г. Разработка математической модели расчета тонкостенных упругих чувствительных элементов систем управления // Сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием „Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе“. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2013. Т. 1. С. 176—183.
6. Лабковская Р. Я., Нечаева Н. В., Пирожникова О. И. Анализ жесткости УЧЭ датчиков и микроакселерометров систем управления // Матер. VII Всерос. межвуз. конф. молодых ученых. 2010. С. 195.
7. Лабковская Р. Я. Исследование напряженно-деформированного состояния сильфонных упругих элементов систем управления // Альманах научных работ молодых ученых НИУ ИТМО. 2012. С. 142-144.
8. Давыдов В. В., Маттес Н. В. Динамические расчеты прочности судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974. 336 с.
9. Сорокин Е. С. Динамический расчет несущих конструкций здания. М.: Госстройиздат, 1956. 340 с.
10. Лабковская Р. Я. Исследование статики и динамики оболочечных упругих элементов систем управления // 16-я Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. СПб, 2011. С. 114.
11. Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л. Метод повышения надежности упругих чувствительных элементов систем управления и автоматики // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1(71). С. 136—138.

12. Лабковская Р. Я. Метрология и электрорадиоизмерения. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 140 с.
13. Лабковская Р. Я. Моделирование статики и динамики элементной базы // Альманах науч. работ молодых ученых НИУ ИТМО. 2012. С. 331—334.
14. Лабковская Р. Я., Ткалич В. Л. Обработка результатов технических измерений. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 72 с.
15. Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И. Сильфонные упругие элементы систем управления // Сб. докл. конгр. молодых ученых. 2012. Вып. 1. С. 163—165.
16. Лабковская Р. Я., Ткалич В. Л., Пирожникова О. И. Разработка библиотеки конечных элементов для САПР упругих конструкций герконов // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 3. С. 21—24.
17. Лабковская Р. Я. Разработка математических моделей упругих чувствительных элементов систем управления // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров НИУ ИТМО. 2011. С. 97—98.
18. Пономарев С. Д., Андреева Л. Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.
19. Сухарев И. П. Экспериментальные методы исследования деформации и прочности. М.: Машиностроение, 2003. 213 с.
20. Гороновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии. Киев: Наукова Думка, 1987. 838 с.

Сведения об авторах

- Алексей Сергеевич Козлов** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербург;
E-mail: zz.kozlov@gmail.com
- Римма Яновна Лабковская** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербург;
E-mail: labkovskaya@mail.ifmo.ru
- Ольга Игоревна Пирожникова** — студентка; Университет ИТМО, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербург;
E-mail: studsovet_itmo@mail.ru
- Вера Леонидовна Ткалич** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем, Санкт-Петербург;
E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru

Рекомендована кафедрой
проектирования и безопасности
компьютерных систем

Поступила в редакцию
25.11.15 г.

Ссылка для цитирования: Козлов А. С., Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л. Анализ внутреннего трения материалов сильфонных чувствительных элементов систем управления // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 2. С. 164—168.

ANALYSIS OF INTERNAL FRICTION FOR MATERIALS OF BELLOWS SENSING ELEMENTS OF CONTROL SYSTEMS

A. S. Kozlov, R. Ya. Labkovskaya, O. I. Pirozhnikova, V. L. Tklich

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: labkovskaya@mail.ifmo.ru

A method for studying damped oscillations of a bellows shell in the presence of internal friction is considered. The logarithmic decrement of the oscillation is taken as a measure of internal friction at static and dynamic loading. Principles of operation of automated complex created for measuring internal friction in bellows sensing elements of control systems are described; the complex affords production of competitive and highly reliable bellows sensing elements. The complex incorporates an apparatus determining the element ability of energy scattering under vibration; a unit used to determine the energy scattering under cyclic loading of the bellows; a setup for studying damping characteristics of the bellows material under transfer vi-

brations and the element loading by static stretching force. The complex is also provided with an instrument for investigating the damping properties of the bellows sensing element material by damp oscillation method and the method of resonance deepening.

Keywords: bellows sensing elements, viscous friction, logarithmic decrement, internal friction, energy scattering

Data on authors

- Aleksei S. Kozlov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Computer System Design and Security; E-mail: zz.kozlov@gmail.com
- Rimma Ya. Labkovskaya** — PhD; ITMO University, Department of Computer System Design and Security; E-mail: labkovskaya@mail.ifmo.ru
- Olga I. Pirozhnikova** — Student; ITMO University, Department of Computer System Design and Security; E-mail: studsovet_itmo@mail.ru
- Vera L. Tklich** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computer System Design and Security; E-mail: vera_leonidovna_tklich@mail.ru

For citation: Kozlov A. S., Labkovskaya R. Y., Pirozhnikova O. I., Tklich V. L. Analysis of internal friction for materials of bellows sensing elements of control systems // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 2. P. 164—168 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-2-164-168