

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕМБРАННЫХ 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

Представлен анализ динамических и статических погрешностей мембранных чувствительных элементов систем управления в условиях комплексных механических и температурных воздействий. В качестве унифицированного параметра, учитывающего взаимосвязь аэро-, гидро-, механо- и термодинамических комплексных воздействий выбрана деформация, называемая ходом мембранного чувствительного элемента. Построены математические модели для расчета динамических и статических погрешностей мембранных чувствительных элементов. Разработанная методика расчета применена при создании серии магнитоуправляемых контактов, обладающих повышенной надежностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками и используемых в системах охранной и пожарной сигнализации.

Ключевые слова: мембранный чувствительный элемент, линейная деформация, угловая деформация, статическая погрешность, динамическая погрешность, ход мембранного чувствительного элемента, комплексные воздействия, герконы

Анализ влияния динамических нагрузок на работу мембранных чувствительных элементов (МЧЭ) систем управления требует учета взаимосвязи всех механических и температурных воздействий, а также ввода унифицированного параметра при расчете погрешностей. Так, для мембранных герконов [1—6] и различных контактных коммутационных многофункциональных устройств [7—10] в качестве такого параметра может быть выбрана деформация, называемая ходом МЧЭ.

Мембранные чувствительные элементы находят широкое применение в устройствах систем управления, а также в системах охранной и пожарной сигнализации. Эти элементы обладают высокой чувствительностью и позволяют осуществлять коммутацию больших токов (более 10 А), что, в свою очередь, позволяет осуществлять коммутацию больших мощностей. В случае комплексного аэро-, гидро-, механо- и термодинамического воздействия на МЧЭ их динамический ход необходимо оценивать как результат совместного воздействия соответствующих аэро-, гидро-, механо- и термодинамических ходов МЧЭ.

Так, линейная деформация описывается уравнением

$$U_{\text{дин}} = U_{\text{а-г}} + U_{\text{мех}} + U_{\text{терм}},$$

где $U_{\text{дин}}$ — динамический ход МЧЭ при комплексном нагружении динамическими нагрузками; $U_{\text{а-г}}$, $U_{\text{мех}}$, $U_{\text{терм}}$ — аэро-, гидродинамический, механодинамический, термодинамический ходы соответственно для каждой составляющей комплексного воздействия.

При угловой деформации динамический ход $\varphi_{\text{дин}}$ МЧЭ представляется аналогичным уравнением

$$\varphi_{\text{дин}} = \varphi_{\text{а-г}} + \varphi_{\text{мех}} + \varphi_{\text{терм}}.$$

Дифференциальные уравнения для МЧЭ в условиях вибрации, пульсации и температурных нагрузок схожи между собой и аналогичны дифференциальным уравнениям эквивалентных электрических цепей.

При измерении статических параметров, таких как статическое давление, динамические воздействия на МЧЭ в виде ударов, гармонической вибрации и линейных нагрузок играют роль вредных воздействий и относятся к категории динамических погрешностей [11, 12]. При этом $U_{\text{дин}}$ можно рассматривать как $\Delta U_{\text{дин}}$, $U_{\text{а-г}}$ — как $\Delta U_{\text{а-г}}$, $U_{\text{мех}}$ — как $\Delta U_{\text{мех}}$, $U_{\text{терм}}$ — как $\Delta U_{\text{терм}}$, тогда суммарная динамическая погрешность МЧЭ рассчитывается по формуле

$$\Delta U_{\text{дин}} = \Delta U_{\text{а-г}} + \Delta U_{\text{мех}} + \Delta U_{\text{терм}}.$$

Аналогично $\varphi_{\text{дин}}$ представляется как $\Delta \varphi_{\text{дин}}$, $\varphi_{\text{а-г}}$ — как $\Delta \varphi_{\text{а-г}}$, $\varphi_{\text{мех}}$ — как $\Delta \varphi_{\text{мех}}$ и $\varphi_{\text{терм}}$ — как $\Delta \varphi_{\text{терм}}$. Соответственно суммарная угловая деформация

$$\Delta \varphi_{\text{дин}} = \Delta \varphi_{\text{а-г}} + \Delta \varphi_{\text{мех}} + \Delta \varphi_{\text{терм}}.$$

Для мембранных рабочих коробок, используемых в датчиках давления, аэро-, гидродинамические погрешности ($\Delta U_{\text{а-г}}$ и $\Delta \varphi_{\text{а-г}}$) являются функциями рабочего объема $V(t)$ внутренней полости рабочей коробки [13].

При линейной деформации МЧЭ расчет динамической погрешности осуществляется с учетом закона сохранения энергии, согласно которому работа, совершаемая МЧЭ, может быть определена по формуле

$$P\Delta V = F\Delta U_{\text{дин}} = PS\Delta U_{\text{дин}},$$

где P — давление, ΔV — приращение объема внутренней полости рабочей коробки датчика давления за счет деформации МЧЭ под воздействием давления, F — перестановочное усилие относительно величины хода $\Delta U_{\text{дин}}$, S — эффективная площадь элемента.

Согласно [13] для мембран

$$\Delta U_{\text{а-г}} = \frac{24}{7\pi R^2} V(t),$$

где функция $V(t)$ зависит от типа воздействия (удар, гармоническая пульсация, линейное нарастание нагрузки) и может быть определена по приведенным в работе [13] формулам.

Далее с учетом максимальной линейной деформации функция объема $V(t)$ определяется согласно линейной теории (при малых деформациях) или нелинейной теории (при больших смещениях).

Для определения динамических погрешностей достаточно приравнять $\Delta U_{\text{мех}} = U(t)$ и $\Delta \varphi_{\text{мех}} = \varphi(t)$, где $U(t)$ и $\varphi(t)$ — решения дифференциальных уравнений динамики МЧЭ при механическом воздействии.

На практике к наиболее опасным и распространенным видам теплового воздействия на МЧЭ относится тепловой удар. При рассмотрении термодинамических погрешностей МЧЭ (или термоупругости МЧЭ) необходимо учитывать взаимосвязь температуры с деформацией элемента [14].

Осесимметричные колебания круглых мембран, происходящие под действием внезапно подведенного к поверхности МЧЭ теплового потока, представляются выражением

$$\Delta \omega_{\text{тем}} = \omega(Q) = qB,$$

где B — функция, зависящая от геометрических размеров МЧЭ, а также теплофизических и упругих свойств материала элемента; Q — количество подводимого тепла; q — собственная частота колебаний круглых мембран.

Определив динамическую погрешность МЧЭ, можно перейти к вычислению общей погрешности при линейной и угловой деформациях:

$$\Delta U_{\text{общ}} = \Delta U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{дин}}; \quad \Delta \varphi_{\text{общ}} = \Delta \varphi_{\text{ст}} + \Delta \varphi_{\text{дин}},$$

где $\Delta U_{\text{ст}}$, $\Delta \varphi_{\text{ст}}$ — статические линейные и угловые погрешности МЧЭ.

Необходимо учитывать тот факт, что статическая погрешность, обусловленная аэро-, гидродинамическими воздействиями, является функцией нагрузки $P(t)$:

$$\Delta U_{\text{ст, а-г}} = U[P(t)] = \gamma P(t); \quad \Delta \varphi_{\text{ст, а-г}} = \varphi[P(t)],$$

где γ — статическая чувствительность МЧЭ относительно давления.

Статическая погрешность при переменных механических воздействиях определяется по формулам

$$\Delta U_{\text{ст, мех}} = U[F(t)] = \gamma^* F(t); \quad \Delta \varphi_{\text{ст, мех}} = \varphi[F(t)],$$

где $\gamma^* = \gamma_{\text{ст}}^*$ — статическая чувствительность МЧЭ относительно силы.

Статические погрешности, вызванные температурными воздействиями, определяются с использованием метода термоупругости:

$$\Delta U_{\text{ст, терм}} = U[T(t)]; \quad \Delta \varphi_{\text{ст, терм}} = \varphi[T(t)],$$

где $T(t)$ — функция температурного воздействия на МЧЭ во времени.

В условиях статического нагружения МЧЭ напряжения σ , вызывающие линейную и угловую деформации, можно представить выражениями

$$\sigma_{\text{ст}} = \sigma(U), \quad \sigma_{\text{ст}} = \sigma(\varphi).$$

Если считать, что $U = U(t)$ и $\varphi = \varphi(t)$, то корреляционная зависимость имеет вид

$$\sigma_1 = \sigma[U(t)] = \sigma(t); \quad \sigma_2 = \sigma[\varphi(t)] = \sigma(t),$$

и соответственно эквивалентное напряжение может быть определено по формуле

$$\sigma_{\text{экр}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2}.$$

Авторами настоящей статьи разработана новая серия магнитоуправляемых контактов, используемых в автоматике для коммутации высокоточных электрических цепей с учетом рассмотренных динамических погрешностей МЧЭ. Серия [3—10] предназначена для систем пожарной и охранной сигнализации, что обусловлено применением в качестве упругого чувствительного элемента дополнительно введенной термобиметаллической пружины и наличием контактных узлов, осуществляющих передачу светового сигнала. Световой контакт обеспечивается использованием оптоволоконного элемента. МЧЭ в этой серии имеют наноструктурированную планарную рабочую поверхность, что ведет к повышению износостойкости, а также к понижению и стабилизации переходного контактного сопротивления [15, 16]. Магнитоуправляемые контакты содержат мембранные ртутно-смачиваемые герконы, что позволяет исключить вредное влияние дребезга контактов при коммутации [17].

Наличие регулярного микрорельефа рабочих поверхностей контактного узла герконов данной серии позволяет исключить спекание и залипание контактов.

Разработанная серия магнитоуправляемых контактов отличается улучшенными эксплуатационными свойствами и расширенными функциональными возможностями, что обеспечивает их конкурентоспособность в современных условиях в качестве чувствительных элементов датчиков и коммутационных устройств систем управления [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2024981 РФ, кл. Н 01 Н 1/66. Магнитоуправляемый контакт / В. Л. Ткалич, Я. М. Беккер, Е. Г. Фролова, Ю. Г. Шнейдер, А. И. Потанов. 1994. Бюл. № 23.

2. Пат. 2016433 РФ, кл. Н 01 Н 1/66. Магнитоуправляемый контакт / В. Л. Ткалич, Я. М. Беккер, Е. Г. Фролова. 1994.
3. Пат. 136920 РФ, кл. Н 01 Н 1/66. Магнитоуправляемый контакт / Р. Я. Лабковская, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова, А. Г. Коробейников. 2014. Бюл. № 2.
4. Пат. 144304 РФ, кл. Н 01 Н 1/66. Мембранный геркон / Р. Я. Лабковская, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова. 2014.
5. Пат. 144305 РФ, кл. Н 01 Н 1/66. Магнитоуправляемый контакт / Р. Я. Лабковская, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова, А. Г. Коробейников. 2014.
6. Пат. 144833 РФ, кл. Н 01 Н 1/66. Мембранный геркон / Р. Я. Лабковская, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова. 2014.
7. Пат. 144834 РФ, кл. Н 01 Н 1/66, Н01 Н51/28. Многоконтактное коммутирующее устройство / Р. Я. Лабковская, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова. 2014.
8. Пат. 144835 РФ, кл. Н 01 Н51/28. Многофункциональное коммутирующее устройство / Р. Я. Лабковская, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова. 2014.
9. Пат. 152655 РФ, кл. Н 01 Н13/00. Мембранный переключатель / Р. Я. Лабковская, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова. 2015.
10. Пат. 156527 РФ, кл. F16 J3/04. Мембранный сильфон / Р. Я. Лабковская, А. С. Козлов, В. Л. Ткалич, О. И. Пирожникова. 2015. Бюл. № 31.
11. Лабковская Р. Я. Исследование статики и динамики мембранных и пластинчатых электромеханических элементов систем управления // Сб. тез. докл. конгресса молодых ученых. СПб: НИУ ИТМО, 2014. Вып. 1. С. 202—203.
12. 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.
13. Корсунов В. П. Упругие чувствительные элементы (статика, динамика, надежность). Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1980. 264 с.
14. Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л. Метод повышения надежности упругих чувствительных элементов систем управления и автоматики // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 1(71). С. 136—138.
15. Лабковская Р. Я. Метрология и электрорадиоизмерения. СПб: НИУ ИТМО. 2013. 140 с.
16. Ткалич В. Л., Лабковская Р. Я., 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., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л. Условие и критерий устойчивости упругих чувствительных элементов герконов // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 10. С. 34—37.

Сведения об авторах

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

Рекомендована кафедрой проектирования и безопасности компьютерных систем

Поступила в редакцию
26.02.16 г.

Ссылка для цитирования: Козлов А. С., Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И., Ткалич В. Л. Анализ погрешностей мембранных чувствительных элементов систем управления // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 5. С. 377—381.

**ERROR ANALYSIS
FOR THE MEMBRANE SENSING ELEMENTS OF CONTROL SYSTEMS**

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

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

Dynamic and static errors of the membrane sensitive elements of control systems under complex mechanical and thermal influences are analyzed. The strain called the membrane element stroke is taken for the unified parameter accounting for interconnection between aerodynamic, hydraulic, mechanical, and thermodynamic complex effects. Mathematical models allowing calculation of the static and dynamic errors of the membrane sensing element of control systems exposed to various mechanical and thermal influences are constructed. The developed approach has been used in designing of several magnetic contacts with increased reliability and improved performance applied in burglar and fire alarm systems.

Keywords: membrane sensing element, linear deformation, angular deformation, static error, dynamic error, move sensitive membrane element, integrated effect, reed switches

Data on authors

- | | |
|------------------------------|--|
| Aleksey 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. Tkalich | — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computer System Design and Security; E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru |

For citation: Kozlov A. S., Labkovskaya R. Ya., Pirozhnikova O. I., Tkalich V. L. Error analysis for the membrane sensing elements of control systems // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 5. P. 377—381 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-5-377-381