

И.П. Попов<sup>1</sup>, В.А. Раков<sup>2</sup><sup>1</sup>Курганский государственный университет,  
<sup>2</sup>Вологодский государственный университет

## ИСКУССТВЕННАЯ УПРУГОСТЬ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Предложена схема устройства, обладающего искусственной или электромагнитной упругостью. Представлено описание физического процесса, связывающего механические и электромагнитные колебания. Искусственная упругость может быть компонентом систем автоматики, а также механического линейного гармонического осциллятора и колебательных устройств с однородными элементами. Предложены возможные направления использования маятников с искусственной упругостью.

Упругость, индуктивность, балансировка, регулирование, маятник, контур.

В ряде систем управления, где используется электро-механическая связь, могут возникать колебательные процессы, вызванные перетеканием энергии между электрической и механической системами. В большинстве случаев, как, например, в быстродействующих реле, такие колебания являются вредными и приводят к искрению контактов и коммутационным колебаниям, как следствие – образование электрической дуги.

В классической механике механическая величина *коэффициент упругости*  $k$  определяется законом Гука. «Натуральная» упругость обуславливается свойствами вещества упругого объекта, под которым обычно имеется в виду пружина, и его формой [1].

В отличие от квазиупругих объектов, для которых закон Гука выполняется лишь для малых деформаций

$$dF = -kdx,$$

под искусственной упругостью следует понимать величину, удовлетворяющую закону Гука при любых возможных перемещениях.

Искусственная упругость может быть компонентом систем автоматики, а также механического линейного гармонического осциллятора и колебательных устройств с однородными элементами [2–4].

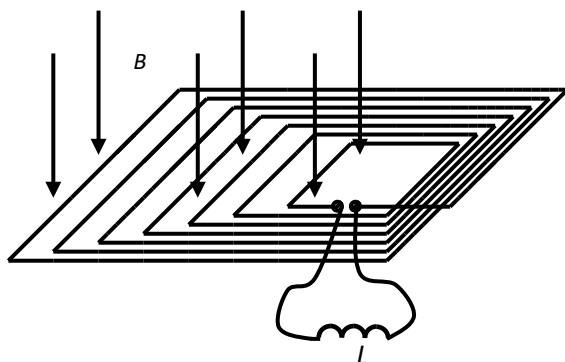


Рис. 1. Устройство, обладающее свойствами искусственной или индуктивной упругости

На рисунке 1 представлено устройство, обладающее свойствами искусственной или индуктивной уп-

ругости. Количество проводящих рамок –  $n$ , длина их активной части –  $l$ , индукция магнитного поля –  $B$ , индуктивность катушки –  $L$ . Масса, активное сопротивление и индуктивность рамок не учитываются.

При перемещении устройства в рамках возникает ЭДС электромагнитной индукции  $e_i = -Blndx/dt$ . В соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$Blnd \frac{\partial x}{\partial t} = -L \frac{\partial i}{\partial t}.$$

Здесь  $-L \partial i / \partial t$  – напряжение на катушке. Пусть для компактности:

$$Blnd = y^{0,5}.$$

Интеграл исходного выражения:

$$y^{0,5} \int_0^t \frac{\partial x}{\partial t} dt = -L \int_0^t \frac{\partial i}{\partial t} dt,$$

$$y^{0,5} x = -Li.$$

С учетом последнего равенства закон Ампера запишется в виде:

$$F = y^{0,5} i = -\frac{y}{L} x = -k_L x.$$

Это запись закона Гука:

$$k_L = \frac{y}{L}$$

– коэффициент индуктивной упругости. В математическом отношении это выражение идентично формуле для упругой индуктивности:

$$L_k = \frac{y}{k}.$$

Искусственная или индуктивная упругость в сочетании с инертным грузом может образовывать маятник, частота которого [3–5]:

$$\omega = \sqrt{\frac{k_L}{m}} = \sqrt{\frac{y}{Lm}}.$$

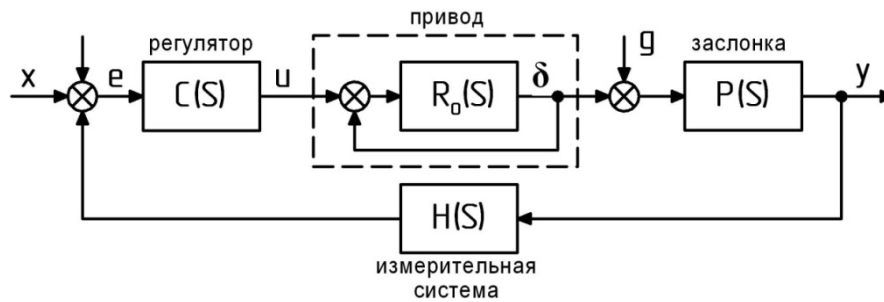


Рис. 2. Структурная схема системы управления

Сравнение этой формулы с выражением для частоты электрического колебательного контура

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

позволяет получить формулу для искусственной или инертной емкости:

$$C_m = \frac{m}{y}$$

из которой, в свою очередь, выводится искусственная или емкостная масса [6–8]:

$$m_c = yC.$$

Описанный выше  $k_{LM}$  маятник в равной мере можно рассматривать как  $C_m L$  электрический колебательный контур.

В рассмотренной электромеханической  $k_{LM}$  ( $C_m L$ ) системе могут возникать свободные гармонические колебания, обусловленные взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию магнитного поля катушки индуктивности.

Искусственная упругость принципиально отличается от аналогии между коэффициентом упругости и индуктивностью, поскольку электромагнитные аналогии не могут применяться в качестве элементов механических систем.

Искусственная упругость может использоваться в устройствах автоматики [9].

Создание искусственной упругости может быть реализовано в электромеханической системе с обратной связью. Рассмотрим пример автоматического устройства управления теплообменным устройством.

Автоматическая система управления включает: теплообменное устройство; регулятор; привод, измерительную систему.

Структурная схема АСУ выглядит следующим образом (рис. 2).

В переходных режимах работы системы могут возникать нежелательные колебания, обусловленные мгновенным откликом – гистерезисом. На практике колебания устраняются за счет удаления порогов срабатывания, что неизбежно приводит к запаздыванию срабатывания. При использовании искусственной упругости обеспечивается защита от вредных колеба-

ний, но при этом время запаздывания срабатывания системы снижается незначительно.

### Литература

1. Патент № 2530474 Российская Федерация, МПК G01H 1/08. Способ экспериментально-теоретического определения собственных сил демпфирования в упругом элементе : № 2013121089/28 : заявл. 07.05.2013 : опубл. 10.10.2014, бюл. № 28 / Александров И. К., Раков В. А.
2. Popov, I. P. Free harmonic oscillations in systems with homogeneous elements / I. P. Popov. – DOI: 10.1016/j.jappmathmech. 2012.09.005// Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2012. – Vol. 76, № 4. – P. 393–395.
3. Попов, И. П. Исследование резонансов в технических системах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 2 (4). – С. 15–18.
4. Попов, И. П. Исследование вариантов и особенностей околорезонансных явлений в механических системах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 1 (11). – С. 12–18.
5. Горелов, В. П. Электромеханические волны и устойчивость энергосистем / В. П. Горелов. – Москва ; Берлин : ООО «Директмедиа Паблишинг», 2016. – 418 с.
6. Попов, И. П. Исследование вынужденных колебаний механических систем / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 4 (6). – Ч. 1. – С. 21–25.
7. Попов, И. П. Исследование вынужденных колебаний механических систем / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 1 (7). – Ч. 2. – С. 27–32.
8. Попов, И. П. Маятник с искусственной массой / И.П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2023. – № 2 (20). – С. 55–57.
9. Патент № 127690 Российская Федерация, МПК B60H 1/18. Система автоматического управления экономайзером отработавших газов : № 2012152765/11 : заявл. 06.12.2012 : опубл. 10.05.2013, бюл. № 13 / Раков В. А., Сеницын А. А., Берхорубов В. В.

*I.P. Popov<sup>1</sup>, V.A. Rakov<sup>2</sup>*  
*<sup>1</sup>Kurgan State University, <sup>2</sup>Vologda State University*

### **ARTIFICIAL ELASTICITY FOR AUTOMATION SYSTEMS**

A scheme of a device with artificial or electromagnetic elasticity is proposed. The description of a physical process linking mechanical and electromagnetic oscillations is presented. Artificial elasticity can be a component of automation systems, as well as of a mechanical linear harmonic oscillator and oscillatory devices with homogeneous elements. The possible variants of use of a pendulum with artificial elasticity were proposed.

Elasticity, inductance, balancing, regulation, pendulum, circuit.