

## ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ АКТУАТОРОВ НА ОСНОВЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

К. А. Нуждин

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: kirill\_nuzhdin@corp.ifmo.ru*

Рассмотрен принцип действия энергоэффективного актуатора для преобразования прикладываемого воздействия в поступательное движение. В качестве рабочего органа актуатора выступает упругий элемент, принцип функционирования которого основан на явлении потери устойчивости. Проанализированы аналоги предложенного механизма. Представлена конструкция исполнительного устройства, описаны основные узлы механизма, а также проведен расчет механических свойств и условий применимости рабочего звена, в роли которого выступает упругий элемент. Полученные результаты можно использовать при проектировании подвижных узловых соединений машин и механизмов, преобразующих приложенную силу в поступательное движение. Предложенный преобразователь движения может применяться в робототехнике в качестве нового вида энергоэффективных актуаторов; он может найти применение в моделях бионических систем.

**Ключевые слова:** *энергоэффективный актуатор, устойчивость упругих систем, критическое поведение, исполнительное устройство, упругий стержень*

В настоящее время практически во всех областях робототехники и биомехатроники для передачи энергии от управляющего объекта к управляемому применяется большое количество различных видов актуаторов. Вид и тип этих исполнительных устройств определяется их способом перемещения и управления механизмом или системой.

Наряду с наиболее распространенными типами актуаторов (механические, электрические, гидравлические и пневматические) существуют сложные и „экзотические“ типы исполнительных устройств, например, пневматический мускул, актуаторы на основе электроактивных полимеров и металлов с эффектом памяти. Однако такие актуаторы не всегда могут удовлетворить требованиям, предъявляемым при проектировании сложных мехатронных устройств, и порой перед конструктором стоит задача разработки нового вида исполнительных устройств узкой специализации.

Главной целью настоящей работы является разработка и исследование исполнительного устройства (актуатора), предназначенного для преобразования прикладываемого воздействия в поступательное движение. В качестве рабочего звена актуатора выступает упругий элемент, принцип функционирования которого основан на явлении потери устойчивости (отклонение от прямого устойчивого положения) под действием прикладываемой силы, а в качестве внешнего возмущающего воздействия — энергия сердечника в катушке индуктивности при автоколебаниях (молоток Маклакова).

Известны два аналога предложенного устройства:

1) мобильный механизм для преобразования приложенной силы в поступательное движение [1], выполненный в виде групп кинематических пар, которые спроектированы таким образом, что при воздействии внешней силы на входной элемент конструкции происходит передача энергии подвижным элементам. Эти элементы представляют собой направляющие, с одной стороны подвижно закрепленные на каркасе устройства, с другой — имеющие вращающиеся ролики, которые с помощью фрикционных колес сообщают данным исполнитель-

ным подвижным элементам вращающий момент. Этот момент позволяет совершить короткое вращательное движение с целью перемещения подвижного основания (нижнего края подвижного элемента, оборудованного роликами) относительно кинематического узла, что, в свою очередь, вызывает поступательное движение всего механизма. К недостаткам этого устройства можно отнести сложность конструкции и потери энергии за счет фрикционного сопротивления, возникающего в кинематических узлах;

2) биомеханический механизм, имитирующий походку животного [2], включает элемент конструкции, который используется для преобразования (с помощью подвижно связанных групп кинематических пар) приложенной силы во вращающий момент, действующий на подвижные направляющие (входной элемент). Эти направляющие с одной стороны закреплены с помощью шарнирного соединения с каркасом, а с другой — оборудованы роликами, вращающимися вокруг собственной оси, для преобразования вращательного движения в поступательное. Конструкция этого устройства включает упругие элементы, выполненные в виде пружины для обеспечения противодействующей силы, необходимой для возвращения входного элемента в начальное положение и обеспечения циклического перераспределения действующих сил. Устройство спроектировано таким образом, что при циклических воздействиях силы на верхний входной элемент за счет упругих свойств пружин приложенная нагрузка преобразуется во вращательный момент. Этот момент действует на нижние элементы конструкции посредством шатуна, за счет чего осуществляется вращательное движение направляющих (ног). К недостаткам устройства относятся: сложность конструкции, множество соединительных узлов, а также зависимость скорости и расстояния перемещения от времени и импульса воздействия прикладываемой силы.

Указанных недостатков лишен сконструированный авторами настоящей статьи механизм исполнительного устройства на основе упругого элемента, схема которого представлена на рис. 1 [3]. На рис. 1 введены следующие обозначения: 1 — основание; 2 — шарнирный узел; 3 — подвижные опоры, оборудованные храповым механизмом; 4 — подвижное звено для передачи приложенной силы нагружения  $P$ ; 5 — упругий элемент; 6 — полукруглый опорный наконечник;  $P_{кр}$  — критическая сила нагружения;  $P_{тр}$  — сила трения;  $P_{изг}$  — изгибающая сила;  $P_p$  — сила реакции опоры;  $\Delta$  — расстояние на которое переместился актуатор,  $a$  — ускорение.

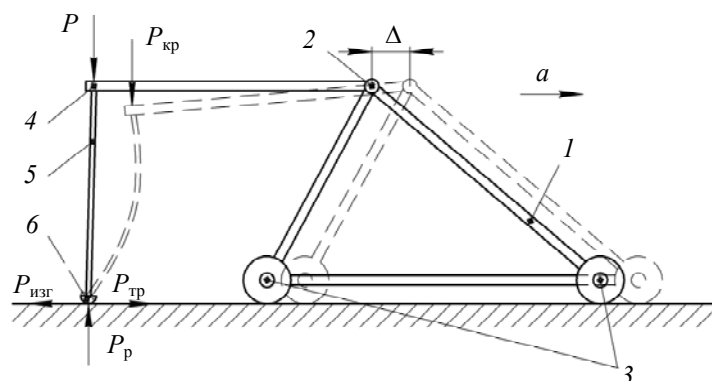


Рис. 1

Принцип работы устройства заключается в следующем: в начальный момент времени в области сопряжения подвижных звеньев 4 и упругого элемента 5 прикладывается сила  $P$ , направленная вертикально вниз. По достижении  $P = P_{кр}$  происходит потеря устойчивости упругого элемента, т.е. под действием возникшего изгибающего момента изменяется прямолинейная форма упругого элемента. Благодаря этому свободный конец упругого элемента (в рассматриваемом случае — нижний край упругого элемента с полукруглым опорным наконечником) начнет отклоняться от прямолинейного устойчивого состояния, однако при возникновении силы трения  $P_{тр}$ , направленной противоположно изгибающей силе  $P_{изг}$ , вся

внутренняя энергия упругого элемента перераспределится и изменит направление на противоположное, сонаправленное с поступательным движением актуатора. При снятии приложенной силы  $P$  упругий элемент примет первоначальную прямолинейную форму, однако подвижное основание (как и весь механизм в целом) не изменит своего положения благодаря храповым механизмам подвижных опор [4—7].

Весь процесс перемещения исполнительного устройства можно разделить на:

- 1) цикл нагружения, когда с помощью приложенной энергии движения массивного сердечника катушки индуктивности происходит кратковременное нагружение упругого элемента, вызывающее изменение прямолинейной формы, — это обеспечивает движение всего механизма;
- 2) рекуперационный цикл; здесь при установлении внешней приложенной силы, меньшей критического значения, происходит восстановление первоначальной формы упругого элемента благодаря энергии, накопленной в процессе потери устойчивости.

В целом предложенное устройство может быть выполнено в широком размерном диапазоне — от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. В частности, линейные размеры упругого элемента непосредственно влияют на свойства рабочего звена и на технические характеристики всего механизма.

Материал для упругого элемента должен обладать высокой упругостью, прочностью, выносливостью, стабильностью во времени механических характеристик [8—10]. Исходя из этих требований в настоящей работе были выбраны: углеродистая сталь качественная (65), сталь марганцовистая (65Г), кремнистая сталь (60С2) и сталь хромованадиевая (50ХФА).

Расчет упругого элемента выполнен на примере сплошных стержней прямоугольного сечения  $5 \times 10$  и  $7 \times 10$  мм длиной  $l=70$  мм. Один конец стержня жестко зашпелен, к другому, свободному, концу приложена сжимающая сила  $P$ , направленная вдоль оси стержня. На рис. 2 продемонстрирован процесс изменения формы стержня под воздействием силы, где  $P > P_{кр}$ ;  $M$  — изгибающий момент;  $\Delta$  — отклонение свободного конца стержня.

При  $P < P_{кр}$  происходит только центральное сжатие стержня, при  $P > P_{кр}$  стержень работает на сжатие и изгиб. Даже при небольшом превышении сжимающей нагрузки критического значения прогибы стержня и возникающие в нем напряжения вполне значительны.

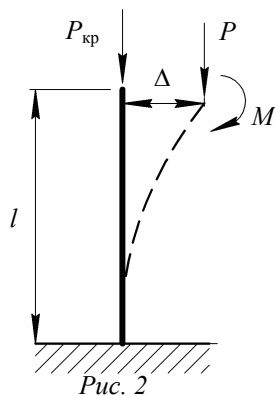


Рис. 2

Потеря устойчивости стержня наступает до момента достижения предельного продольного напряжения  $\sigma_{пр}$  стержня от сжатия, которое равно пределу (условному) текучести для пластичных материалов ( $\sigma_{пр} = \sigma_T$ , если диаграмма сжатия имеет площадку текучести;  $\sigma_{пр} = \sigma_{0,2}$ , если диаграмма сжатия не имеет выраженной площадки текучести) или пределу прочности при испытании на сжатие для хрупких материалов ( $\sigma_{пр} = \sigma_{в.с}$ ) [11].

Обычно потеря устойчивости системы сопровождается значительными перемещениями, возникновением пластических деформаций или разрушением. Возможны также случаи, когда система, потеряв устойчивость, переходит в режим незатухающих колебаний. Потеря устойчивости происходит внезапно, при низких значениях напряжения, когда запас прочности материала еще не исчерпан.

При анализе устойчивости конструкций следует различать устойчивое и неустойчивое равновесие системы. При устойчивом равновесии тело, выведенное какой-либо силой из первоначального положения, возвращается в это положение после прекращения действия силы. При неустойчивом равновесии тело, выведенное из первоначального положения, продолжает деформироваться в направлении действия силы и после прекращения воздействия в исходное состояние не возвращается. В этом случае говорят, что произошла потеря устойчивости.

Между состояниями устойчивого и неустойчивого равновесия существует переходное состояние, называемое критическим, при котором деформированное тело находится в „без-

различном“ равновесии: оно может сохранить первоначальную форму, но может и потерять ее от самого незначительного возмущения [12—15].

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что для отклонения свободного конца стержня (и, как следствие, перемещения подвижного основания актуатора) необходимо приложить к нему силу  $P > P_{кр}$ , однако значение  $P$  должно быть меньше значения, при котором стержень достигнет предельного продольного напряжения от сжатия. В настоящей работе рассматриваются только стержни большой гибкости, т.е. те, для которых справедлива формула Эйлера. Таким образом, можно составить систему уравнений, описывающую условия применения упругого элемента:

$$\left. \begin{aligned} P_{кр} &= \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2} \leq P, \\ \sigma_{кр} &= \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2 A} < \sigma_T, \\ \lambda &= \frac{\mu l}{i_{\min}} \geq \lambda_{пр} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{пц}}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $EJ_{\min}$  — изгибная жесткость ( $E$  — модуль Юнга упругости материала;  $J_{\min}$  — минимальный момент инерции поперечного сечения);  $\mu$  — коэффициент приведения длины стержня;  $\sigma_{кр}$  — критическое продольное напряжение;  $\lambda$  — гибкость стержня;  $A$  — площадь поперечного сечения стержня;  $i_{\min}$  — минимальный радиус инерции поперечного сечения;  $\lambda_{пр}$  — предельная гибкость стержня;  $\sigma_{пц}$  — предел пропорциональности.

В таблице представлены механические свойства упругих стержней, выполненных из различных материалов.

Материал	Поперечное сечение, м	$\sigma_{кр}$ , МПа	$P_{кр}$ , Н	$P$ , Н	$\Delta$ , м
Сталь 65	0,005×0,001	8,602	43,009	43,1	0,006
				43,2	0,008
				43,25	0,009
	0,007×0,001		60,213	60,3	0,005
				60,7	0,011
				60,9	0,013
Сталь 65Г	0,005×0,001	9,021	45,107	45,2	0,006
				45,3	0,008
				45,4	0,01
	0,007×0,001		63,15	63,2	0,004
				63,5	0,009
				64,1	0,015
Сталь 60С2	0,005×0,001	8,896	44,478	44,5	0,003
				44,6	0,007
				44,78	0,01
	0,007×0,001		62,269	62,3	0,003
				62,8	0,012
				63,2	0,015
Сталь 50ХФА	0,005×0,001	9,147	45,737	45,8	0,005
				45,9	0,008
				46,1	0,011
	0,007×0,001		64,031	64,1	0,004
				64,5	0,011
				65	0,015

В работе спроектирована конструкция энергоэффективного актуатора, рассчитано его рабочее звено, выполненное в виде сплошного стального стержня прямоугольного сечения. По сравнению с рассмотренными аналогами, конструкция более проста за счет уменьшения числа соединительных узлов и кинематических пар. Предложенный актуатор может найти применение во многих областях машиностроения, особенно в различных подвижных узлах машин и механизмов, преобразующих приложенную силу в поступательное движение исполнительного звена; также актуатор можно использовать в робототехнике в качестве нового вида энергоэффективных устройств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pat. 101172203B CN. Mobile mechanism / *Nie Wenlong*. 08.12.2010
2. Pat. 2734289Y CN. Bionic mechanical walking animal / *Sheng Ming Yi*. 19.10.2005.
3. Пат. 172799 РФ. Исполнительное устройство на основе упругого элемента / *В. М. Мусалимов, К. А. Нуждин*. 24.07.2017.
4. *Крагельский И. В.* Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
5. *Мусалимов В. М.* Бифуркационная составляющая трения скольжения // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 8. С. 793—796.
6. *Nuzhdin K., Musalimov V. M.* Influence of Roughness Parameters on Dynamics of a Friction Interaction // Proc. of the 16th Intern. Symp. “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and “Doctoral School of Energy and Geotechnology III”. 2017. P. 189—192.
7. *Nuzhdin K., Musalimov V. M.* The experimental determination of bifurcation components of friction // Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. P. 1478—1483.
8. *Андреева Л. Е.* Упругие элементы приборов. М.: Машгиз, 1962. 456 с.
9. *Александров А. В., Потапов В. Д.* Основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк., 1990. 400 с.
10. *Головин А. А., Костиков Ю. В., Красовский А. Б.* и др. Динамика механизмов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 160 с.
11. *Биргер И. А.* Расчет на прочность деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
12. *Циглер Г.* Основы теории устойчивости конструкций. М.: Мир, 1970. 194 с.
13. *Томпсон Дж. М. Т.* Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. М.: Мир, 1985. 254 с.
14. *Гилмор Р.* Прикладная теория катастроф: в 2 кн. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 350 с.
15. *Болотин В. В.* Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. М.: Физматгиз, 1961. 339 с.

#### Сведения об авторе

**Кирилл Андреевич Нуждин**

— аспирант; Университет ИТМО; кафедра мехатроники;  
E-mail: kirill\_nuzhdin@corp.ifmo.ru

Поступила в редакцию  
21.11.17 г.

**Ссылка для цитирования:** *Нуждин К. А.* Проблемы создания актуаторов на основе упругих элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 148—153.

## PROBLEMS OF CREATING ACTUATORS BASED ON ELASTIC ELEMENTS

K. A. Nuzhdin

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: kirill\_nuzhdin@corp.ifmo.ru

The action principle of a power-efficient actuator for transforming an applied force into translational movement is considered. An elastic element (which has the functioning principle based on the phenomenon of loss of stability) is used as an operating element of the device. An analysis of analogues of the proposed mechanism is presented. An actuator design is proposed, and the main components of the mechanism are described. Calculations of the mechanical properties are carried out. Conditions for the applicability of a working unit of the device (an elastic element) are formulated. It is supposed that the obtained results can be used in design of machines and mechanisms, in robotics area as a new type of power-efficient actuators, and in the process of bionic systems modeling.

**Keywords:** power-efficient actuator, stability of elastic system, supercritical behavior, executing device, elastic rod

**Data on author**

**Kirill A. Nuzhdin** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of Mechatronics;  
E-mail: kirill\_nuzhdin@corp.ifmo.ru

**For citation:** Nuzhdin K. A. Problems of creating actuators based on elastic elements. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 2. P. 148—153 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-148-153