

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРУЖИННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ УРАВНОВЕШИВАНИЯ И МЕХАТРОННЫХ ПРУЖИННЫХ ПРИВОДАХ

М. В. ЖАВНЕР, М. А. ГОЛОВИН, СЭНЬ ЛИ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251, Санкт-Петербург, Россия,  
E-mail: milanaj@mail.ru*

Решены задачи уравнивания вертикальных нагрузок в различных подъемных устройствах. Рассмотрены нелинейные пружинные аккумуляторы, которые могут быть использованы для уравнивания вертикальной нагрузки в подъемных устройствах, в различных мехатронных пружинных приводах с рекуперацией энергии и в тактильных датчиках промышленных роботов. Проанализированы законы движения, которые могут быть получены в пружинных приводах с рекуперацией энергии, построенных на базе пружинных аккумуляторов с выходным поворотным звеном и предназначенных для шаговых приводов, приводов с возвратно-вращательным и возвратно-поступательным движениями. Выполнен сравнительный анализ основных характеристик различных пружинных аккумуляторов для решения задачи уравнивания, даны рекомендации по использованию различных законов движения в мехатронных пружинных приводах.

**Ключевые слова:** *системы уравнивания, пружинный аккумулятор, мехатронные системы, пружинные приводы, энергосбережение, диссипативные потери*

Одним из направлений снижения затрат энергии в технологическом оборудовании является снижение затрат на преодоление сил тяжести. Традиционно для этих целей применяется уравнивание с помощью грузов, примеры: лифт, нефтяные качалки с противовесом.

Одной из составляющих силы тяжести являются масса подвижных звеньев механизма (постоянная статическая нагрузка), другой — сила тяжести (переменная статическая нагрузка), обусловленная массой переносимого или перевозимого груза, которая может изменяться от нулевого до максимального значения, равного грузоподъемности механизма. Для компенсации статических нагрузок используются дополнительные приводы системы уравнивания, которые развивают усилия, равные по значению, но противоположные по направлению статическим нагрузкам основного привода. Системы статического уравнивания нагрузок существенно улучшают энергетические характеристики. По классификации систем уравнивания одним из источников энергии может быть сила упругой деформации, однако более широко, в частности в промышленных роботах [1, 2], применяются пружинные аккумуляторы.

Для реализации степеней подвижности исполнительных устройств используются поступательные и вращательные пары, статические нагрузки в которых могут быть постоянными для поступательных пар, либо изменяться по синусоидально-косинусоидальному закону для вращательных пар [3]. В работах [4—6] решена задача управления нагрузками.

В настоящей работе решены задачи уравнивания вертикальных нагрузок в различных подъемных устройствах и рассмотрены нелинейные пружинные аккумуляторы, которые могут использоваться также в различных мехатронных пружинных приводах с рекуперацией энергии [7—11] и в тактильных датчиках промышленных роботов.

На рис. 1 представлена схема, на основе которой обеспечивается горизонтальная стабилизация платформы транспортных средств.

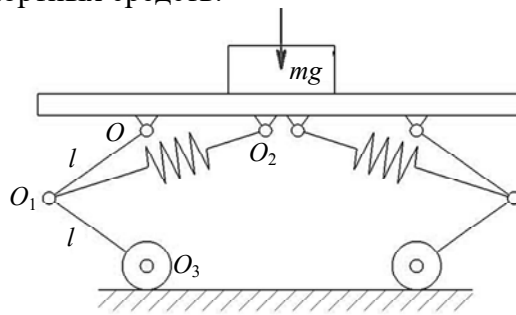


Рис. 1

Платформа оснащена системой уравнивания, включающей пружинные аккумуляторы, состоящие из поворотного звена, и пружины с жесткостью  $c$ , шарнирно соединенные с нижними звеньями, на которых закрепляются колеса.

Звено пружинного аккумулятора шарнирно соединено одним концом с платформой, а вторым — с пружиной растяжения, второй конец которой закреплен на платформе. Пружинный аккумулятор шарнирно соединен с нижним звеном, которое в свою очередь, соединено с колесом.

На рис. 2 представлена схема пружинного аккумулятора с гибким элементом и двумя пружинами растяжения ( $l$  — длина поворотного рычага;  $a$  — расстояние между точками крепления выходного поворотного звена и пружины с основанием). Такая схема позволяет обеспечить синусоидальную моментную характеристику.

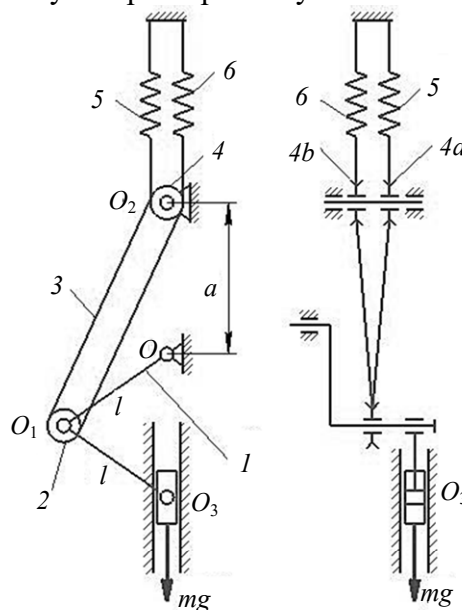


Рис. 2

В точке  $O_1$  на поворотном рычаге  $l$  установлен блок 2. На оси  $O_2$  установлены два блока 4. Пружинный аккумулятор снабжен двумя пружинами растяжения 5 и 6. Пружины соединены между собой с помощью гибкого элемента 3, перекинутого через блоки 2 и 4. В расчетах для этого пружинного аккумулятора используется суммарная жесткость пружин. Система блоков и гибкого элемента образует сдвоенный полиспаст с кратностью 1. Гибкий элемент выполнен в виде двух тросов или стальных лент, концы которых закреплены на концах пружин. Вторые концы пружин закреплены на основании. Соединенный с пружиной 5 трос охватывает блок 4a, наматывается на него против часовой стрелки, и обхватив блок 2, переходит к блоку 4b, наматывается на него по часовой стрелке и соединяется с пружиной 6.

На рис. 3, 4 представлены схемы уравнивающих устройств, позволяющие реализовать приближенную моментную характеристику пружинного аккумулятора, изменяющуюся по синусоидальному закону, с минимальным количеством элементов и демонстрирующие различные компоновочные решения (рис. 3 — с пружиной растяжения; 4 — с пружиной сжатия).

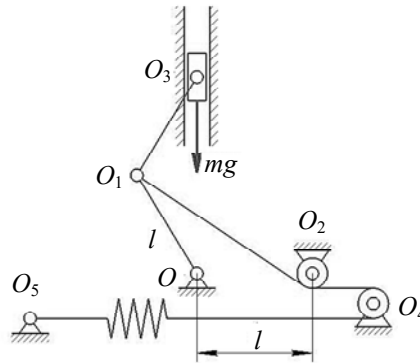


Рис. 3

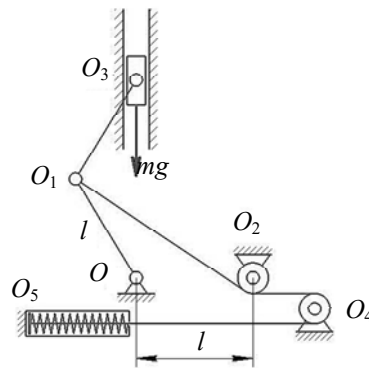


Рис. 4

Основной для рассматриваемого класса пружинных аккумуляторов с выходным поворотным звеном является моментная характеристика [11—13]:

$$M = acl \left( 1 - \frac{a-l}{l^2 + a^2 + 2al \cos q} \right) \sin q,$$

где  $q$  — текущий угол поворота выходного звена.

Для удобства анализа размер  $l$  принят за единичный и введен безразмерный коэффициент  $a_r = a/l$ , определяющий конструктивные параметры пружинного аккумулятора. Межосевое расстояние определяется выбранной пружиной, которая характеризуется максимальным усилием  $F_{\max}$ , жесткостью  $c$  и коэффициентом удлинения  $K_y$ .

Уравнение момента представлено в следующем виде:

$$M = cl^2 M_a,$$

где  $M_a = a_r \left( 1 - \frac{a_r - 1}{\sqrt{1 + a_r^2 + 2a_r \cos q}} \right) \sin q$  определяет вид моментной характеристики в общем

виде, по виду аналогичной закону ускорения.

Обеспечение точности уравнивания зависит от точности воспроизведения закона движения. Уравнение момента от сил упругости пружины, приведенного к валу поворотного звена с учетом предварительной деформации пружины имеет вид

$$M_{\text{уп}} = (l + l_0) cl \sin q - \frac{l_0 (l + l_0) cl \sin q}{L} - \frac{s_1 (l + l_0) cl \sin q}{L},$$

где  $L = \sqrt{l^2 + (l+l_0)^2 - 2(l+l_0)\cos q}$  — длина пружины,  $s_1$  — значение предварительного удлинения пружины, обеспечивающее требуемую предварительную деформацию,  $l_0$  — минимальная длина пружины.

На рис. 5 показаны моментные характеристики пружинного аккумулятора (ПА) с выходным поворотным звеном при различных межосевых расстояниях ( $1 — a_r = 1, 2 — 5$ ) и единичной длине выходного поворотного звена.

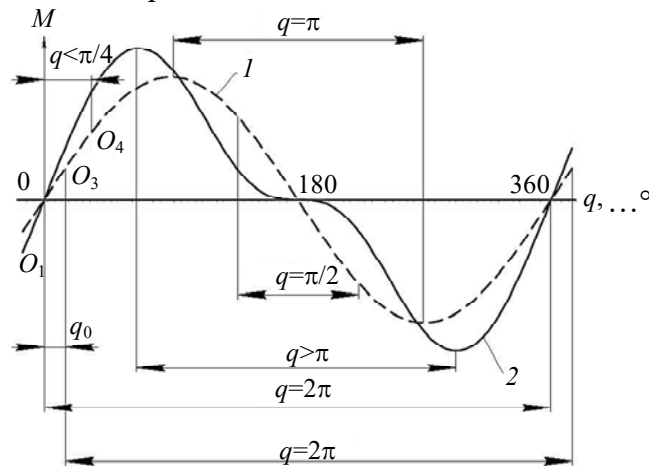


Рис. 5

Эти характеристики можно использовать в мехатронных пружинных приводах. В зависимости от характеристик используемого передаточного механизма можно получить синусоидальный закон ускорения при угле поворота  $2\pi$ , косинусоидальный закон ускорения при угле поворота  $\pi$ , и при угле поворота  $\pi/2$  можно получить практически линейный закон ускорения.

Вследствие динамических и конструктивных ограничений реализовать пружинный аккумулятор с синусоидальной моментной характеристикой и углом поворота  $2\pi$  можно при использовании гибкой связи между поворотным звеном и пружиной. Пружинный аккумулятор с синусоидальной моментной характеристикой также можно реализовать в системах уравнивания звеньев при их вертикальном расположении, при  $q < 2\pi$ , и в случае  $a=l$ . Приближение к синусоидальной моментной характеристике позволяет получать ПА с выходным поворотным звеном, созданный на базе гибкого элемента, который также позволяет реализовать различные компоновочные решения [4, 12].

С помощью ПА с выходным поворотным звеном можно получить несколько законов движения. Отрезок моментной характеристики  $OO_5$  соответствует ПА с углом поворота  $2\pi$ . Этот участок моментной характеристики расположен между точками неустойчивого равновесия и для реализации этого закона движения необходимо использование фиксаторов.

Сравнительный анализ характеристик пружинных аккумуляторов и типовых приводов для цикловых перемещений приведен в работе [7].

Участок  $\pi/2 \leq q \leq 3\pi/2$  от точки  $O_6$  до точки  $O_7$  описывается косинусоидальной моментной характеристикой, данный режим можно использовать для возвратно-качательного движения с использованием фиксаторов для обеспечения технологического выстоя. Отрезок  $OO_4$  практически характеризуется линейной зависимостью, и этот участок моментной характеристики может быть использован, например в тактильных датчиках, для получения „обратной“ характеристики (пружинный привод аналогичен пружине сжатия, но при деформации сжатия усилие пружины не увеличивается, а уменьшается). Такой пружинный механизм можно использовать в тех устройствах, в которых резко возрастает нагрузка, — для ее стабилизации. При углах поворота  $q < 2\pi$  можно использовать линейную зависимость  $\sin q = q$ .

Представленные на рис. 5 моментные характеристики можно реализовать в приводах, обеспечивающих вращательное движение, в частности для шагового перемещения поворотных столов фасовочно-упаковочного оборудования, возвратно-качательное движение, например, для кантователей, позволяющих осуществлять переориентацию груза на  $180^\circ$ , в системах уравновешивания и т.д.

Базовое время поворота при заданном приведенном моменте инерции  $J$  определяется жесткостью пружины  $c$  и конструктивными параметрами ПА: размерами  $a$  и  $l$ .

На участке  $\pi/2 \leq q \leq 3\pi/2$  при косинусоидальной моментной характеристике данный режим можно использовать для реализации возвратно-качательного движения, при этом уравнение для определения времени [11] можно записать в виде:

$$t = \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{J}{c} K_{tq}},$$

где  $J$  — приведенный к оси поворотного звена момент инерции системы,

$$K_{tq} = \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \frac{dq}{\sqrt{\left(\sqrt{1+a_r^2} - (a_r - 1)\right)^2 - \left(\sqrt{1+a_r^2} + 2a_r \cos q - (a_r - 1)\right)^2}}.$$

При угле поворота  $2\pi$  можно получить или точный синусоидальный закон ускорения (пружинный аккумулятор с предварительной деформацией пружины), или квазисинусоидальный закон. Реализация точного синусоидального закона необходима в пружинных механизмах с постоянным усилием на всем пути выходного звена. Схема привода с постоянным усилием представлена на рис. 6.

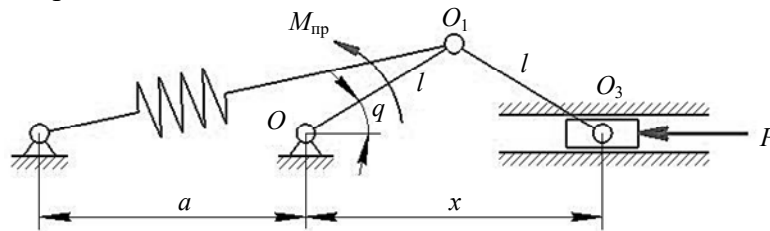


Рис. 6

Уравнение мгновенных мощностей имеет вид  $P\dot{x} = M_{\text{пр}}\dot{q}$  или  $M_{\text{пр}} = \frac{P \cdot \dot{x}}{\dot{q}}$

$$\begin{aligned} 2l \cos q &= x, \\ 2l \sin q \cdot \dot{q} &= \dot{x}, \end{aligned}$$

тогда  $M_{\text{пр}} = P2l \sin q$ .

Синусоидальный закон можно реализовать только по схеме пружинного аккумулятора с трособлочной системой и с применением как пружин сжатия, так и растяжения (обязательна их предварительная деформация).

Максимальная потенциальная энергия пружинного аккумулятора с предварительной деформацией пружины имеет вид

$$V_{\text{max}} = \frac{1}{2} c (2l + s_1)^2,$$

где  $s_1$  — предварительное удлинение пружины, обеспечивающее требуемую предварительную деформацию.

Минимальная потенциальная энергия пружинного аккумулятора в положении устойчивого равновесия с учетом предварительной деформации описывается следующим выражением:

$$V_{\text{min}} = \frac{1}{2} c s_1^2.$$

Разность между максимальной и минимальной потенциальными энергиями пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном при предварительной компенсации диссипативных потерь имеет вид

$$A_d = V_{\max} - V_{\min}.$$

Для пружинного аккумулятора, применяемого в приводе с предварительной компенсацией диссипативных потерь, межосевое расстояние вычисляется с учетом предварительного удлинения пружины, обеспечивающего требуемую предварительную деформацию, по формуле:

$$a = l + l_0 + s_1.$$

Вышеприведенные формулы справедливы для пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном.

В работе проанализированы законы движения, которые могут быть получены в мехатронных пружинных приводах с рекуперацией энергии, построенных на базе пружинных аккумуляторов с выходным поворотным звеном и предназначенных для шаговых приводов, приводов с возвратно-вращательным и возвратно-поступательным движениями и для систем уравнивания. Приведен сравнительный анализ основных характеристик различных пружинных аккумуляторов для решения задачи уравнивания и даны рекомендации по использованию различных законов движения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корендяев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И., Владов И. Л., Данилевский В. Н., Жавнер В. Л., Колисков А. Ш., Петров Л. Н., Серков Н. А., Модестов М. Б., Ушаков В. И., Тихомиров В. Г., Ковалев В. Е. Манипуляционные системы роботов. М.: Машиностроение, 1989. С. 279—286.
2. Корендяев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И. Теоретические основы робототехники. Кн. 1. М.: Наука, 2006. 383 с.
3. Zhavner V. L. and Matsko O. N. Spring drives for reciprocal motion // J. of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. N 1. P. 1—5.
4. Жавнер М. В. Моментные характеристики пружинных аккумуляторов с выходным поворотным звеном // Современное машиностроение. Наука и образование: Матер. 6-й Междунар. науч.- практ. конф. (22—23 июня 2017 г.). СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. С. 450—461.
5. Жавнер М. В. Законы движения пружинных приводов на базе пружинных аккумуляторов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2018. № 5. С. 645—653.
6. Жавнер В. Л., Жавнер М. В. Законы движения мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии // Проблемы механики современных машин: Матер. VII Междунар. науч. конф. Улан-Удэ, 25—30 июня 2018 г. С. 48—52.
7. Zhavner V. L., Matsko O. N., Zhavner M. V. Comparative Analysis of Mechatronic Drives for Reciprocal Motion // Intern. Rev. of Mechanical Engineering (I.RE.ME.). 2018. Vol. 9, N 12. P. 784—789.
8. Жавнер В. Л., Мацко О. Н. Рекуперативные приводы для цикловых перемещений с пневматическим компенсатором диссипативных сил // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. № 4. С. 513—521.
9. Zhavner V. L., Matsko O. N. Spring drives for reciprocal motion // J. of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. N 1. P. 1—5.
10. Надеждин И. В., Мочанов А. А. Динамика мехатронных рекуперативных приводов загрузочных устройств автоматизированных сборочных систем // Вестн. Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2015. № 1(32). С. 19—24.
11. Пелупесси Д. С., Жавнер М. В. Пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном для шаговых перемещений // Изв. вузов. Машиностроение. 2016. № 10(679). С. 9—17.

12. Пелупесси Д. С., Жавнер М. В. Пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2016. Т. 18, № 1(2). С. 256—259.
13. Жавнер В. Л., Мацко О. Н., Жавнер М. В., Чжао Вэнь. Мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии в технологическом оборудовании: учеб. пособие. СПб: Политех-пресс, 2019. 77 с.

#### Сведения об авторах

- Милана Викторовна Жавнер** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа машиностроения;  
E-mail: milanaj@mail.ru
- Михаил Александрович Головин** — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; Высшая школа автоматизации и робототехники;  
E-mail: muxagolovin@gmail.com
- Сэнь Ли** — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; Высшая школа машиностроения;  
E-mail: 15952261994@163.com

Поступила в редакцию  
03.02.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Жавнер М. В., Головин М. А., Ли Сэнь. Использование нелинейных пружинных аккумуляторов в системах уравнивания и мехатронных пружинных приводах // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 330—337.

### USING NONLINEAR SPRING ACCUMULATORS IN BALANCING SYSTEMS AND MECHATRONIC SPRING DRIVES

M. V. Zhavner, M. A. Golovin, Sen Li

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
195251, St. Petersburg, Russia  
E-mail: milanaj@mail.ru

The problems of balancing vertical loads in various lifting devices are solved. Решены задачи уравнивания вертикальных нагрузок в различных подъемных устройствах. Consideration is given to nonlinear spring accumulators that can be used to balance vertical loads in lifting devices, in various mechatronic spring drives with energy recovery, and in tactile sensors of industrial robots. The laws of motion that can be realized in spring drives with energy recovery, built on the basis of spring accumulators with an output rotary link and designed for stepper drives, drives with reciprocating and reciprocating movements, are analyzed. A comparative analysis of the main characteristics of various spring accumulators for solving the balancing problem is given, and recommendations for using different laws of motion are formulated.

**Keywords:** balancing systems, spring accumulator, mechatronic systems, spring drives, energy saving, dissipative losses

#### REFERENCES

1. Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I., Vladov I.L., Danilevskiy V.N., Zhavner V.L., Koliskor A.Sh., Petrov L.N., Serkov N.A., Modestov M.B., Ushakov V.I., Tikhomirov V.G., Kovalev V.E. *Manipulyatsionnyye sistemy robotov* (Manipulation Systems of Robots), Moscow, 1989, pp. 279—286. (in Russ.)
2. Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. *Teoreticheskiye osnovy robototekhniki. Kn. 1* (Theoretical Foundations of Robotics. Book 1), Moscow, 2006, 383 p. (in Russ.)
3. Zhavner V.L. and Matsko O.N. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, no. 1, pp. 1—5.
4. Zhavner M.V. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i Obrazovaniye* (Modern Engineering. Science and Education), Materials of the 6th Intern. scientific-practical conf., St. Petersburg, June 22—23, 2017, pp. 450—461. (in Russ.)
5. Zhavner M.V. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i Obrazovaniye*, 2018, no. 5, pp. 645—653. (in Russ.)
6. Zhavner V.L., Zhavner M.V. *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin* (Problems of the Mechanics of Modern Machines), Materials of the VII Intern. scientific conf. 2018, pp. 48—52. (in Russ.)
7. Zhavner V.L., Matsko O.N., Zhavner M.V. *Comparative Analysis of Mechatronic Drives for Reciprocal Motion. International Review of Mechanical Engineering (I.RE.ME.)*, 2018, no. 9(12), pp. 784—789.
8. Zhavner V.L., Matsko O.N. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i Obrazovaniye*, 2014, no. 4,

- pp. 513–521. (in Russ.)
9. Zhavner V.L., Matsko O.N. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, no. 1, pp. 1–5.
  10. Nadezhdin I.V., Mochanov A.A. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P. A. Solov'yeva*, 2015, no. 1(32), pp. 19–24. (in Russ.)
  11. Pelupessi D.S., Zhavner M.V. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2016, no. 10(679), pp. 9–17. (in Russ.)
  12. Pelupessi D.S., Zhavner M.V. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, no. 1(18), pp. 256–259. (in Russ.)
  13. Zhavner V.L., Matsko O.N., Zhavner M.V., Zhao Wen. *Mekhatronnyye pruzhinnyye privody s rekuperatsiyey energii v tekhnologicheskoy oborudovanii* (Mechatronic Spring Drives with Energy Recovery in Technological Equipment), St. Petersburg, 2019, 77 p. (in Russ.)

**Data on authors**

- Milana V. Zhavner** — PhD; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Mechanical Engineering; E-mail: milanaj@mail.ru
- Michail A. Golovin** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Automation and Robotics; E-mail: muxagolovin@gmail.com
- Sen Li** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Mechanical Engineering; E-mail: 15952261994@163.com

**For citation:** Zhavner M. V., Golovin M. A., Li Sen. Using nonlinear spring accumulators in balancing systems and mechatronic spring drives. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 4. P. 330–337 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-330-337