

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРЕВЕРСИВНОГО ШАГОВОГО ПРИВОДА С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ

И. В. ЛАЗАРЕВ, М. В. ЖАВНЕР

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

Рассмотрены нереверсивные шаговые приводы с пружинным аккумулятором, позволяющие снизить энергопотребление при выполнении технологических процессов. Рассмотрены кинематические схемы компоновки шагового привода, выбраны оптимальные конструкции управляющих узлов и разработана экспериментальная установка нереверсивного шагового привода с рекуперацией энергии. Испытания, проведенные с помощью экспериментальной установки нереверсивного шагового привода, позволили сравнить ранее полученные теоретические данные с экспериментальными. Проведен сравнительный анализ временных показателей пневматического шагового привода и привода с рекуперацией энергии. Полученные результаты показали, что применение пружинного аккумулятора позволяет значительно снизить энергетические затраты. Применение пружинного привода экономически выгодно в промышленной сфере.

Ключевые слова: поворотный стол, пружинные аккумуляторы, рекуперация энергии, шаговый привод, нереверсивный привод

В современном мире промышленные производства стремятся к автоматизации технологических процессов. Основным потребителем энергии в промышленности являются традиционные механизмы с электромеханическими приводами, способные обеспечивать высокое быстродействие за счет сокращения времени перемещения, что в свою очередь требует работы двигателей на максимальных мощностях при разгоне. Стремление снизить энергетические затраты и уменьшить массогабаритные параметры приводов определяет актуальность настоящей работы.

Основная задача работы заключается в создании пружинных приводов для поворотных столов, в которых использованы пружинные аккумуляторы с цилиндрическими пружинами растяжения или сжатия.

При рассмотрении цикла работы технологического оборудования можно сделать вывод, что энергопотребление определяют следующие характеристики: масса подвижных элементов, массогабаритные параметры, система приводов и установочная мощность.

Основная задача цикловых механизмов состоит в перемещении заданной массы с определенной точностью за требуемое время. Для снижения энергетических затрат в шаговых приводах целесообразно использовать пружинные аккумуляторы как основной двигатель, а для компенсации диссипативных потерь — пневматический привод.

Наиболее широко пружинные механизмы применяются в робототехнических системах, рекуперативных приводах и системах уравнивания [1—4]. Другой областью применения пружинных аккумуляторов может быть оборудование для испытания на нагрузки различных элементов машин в целях определения их срока службы и надежности. В этом случае при требуемой рабочей нагрузке на испытываемые детали затраты энергии будут снижены, по крайней мере на порядок, по сравнению с типовыми стендами.

При построении пружинных приводов с рекуперацией энергии используется свойство колебательных систем: энергия, затраченная на разгон инерционной массы, из кинетической переходит в потенциальную, и наоборот. Такой привод должен быть оснащен аккумуляторами механической энергии и управляемыми фиксаторами [2—6].

В рекуперативных приводах обеспечиваются плавность разгона и торможения и выход в точку позиционирования практически с нулевой скоростью, что устраняет необходимость в демпферах и требует только установки фиксаторов.

В работах [1, 2] приводятся основы построения рекуперативного привода цикловых промышленных роботов с электродвигателями для компенсации диссипативных потерь. Методика расчета такого пружинного привода с рекуперацией энергии приведена в работах [7, 8].

Быстродействие пружинного привода определяется собственными динамическими свойствами колебательной системы, и теоретически при известном приведенном моменте инерции системы всегда можно подобрать жесткость пружины c так, чтобы обеспечить требуемое быстродействие.

Пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном также применяют в приводах с рекуперацией энергии для шаговых перемещений и уравнивающих устройств [7—14]. В целях повышения энергетической эффективности приводов сборочных машин-автоматов с дискретным перемещением исполнительного органа в качестве двигателя используют пружины растяжения или сжатия при реализации принципа рекуперации энергии [13, 14].

Основным двигателем поворотных столов технологического оборудования служит пружинный аккумулятор с выходным поворотным звеном (рис. 1, угол поворота 2π), получивший в литературе название кривошипно-кулисного механизма с пружиной растяжения или сжатия [11].

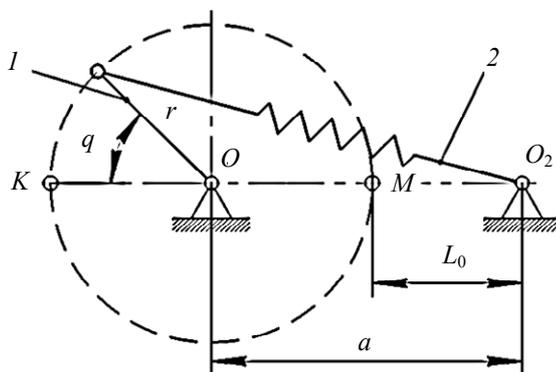


Рис. 1

На рис. 1 цилиндрическая пружина растяжения 2 соединена непосредственно с поворотным звеном 1 и основанием. При вращении вокруг оси O точка O_1 совершает поворот на угол $q = 2\pi$. Точка K соответствует положению неустойчивого равновесия, а M — устойчивого.

Основными геометрическими характеристиками пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном являются: r — радиус выходного звена, L_0 — минимальная длина пружины, L_{\max} — максимальная длина пружины, a — расстояние между осями шарнирных соединений выходного звена и пружины с основанием, q — текущий угол поворота выходного звена.

В процессе проектирования экспериментального стенда шагового привода поворотного стола рассматривались различные варианты компоновки с целью выбора оптимального варианта.

На рис. 2 приведен типовой механизм шагового пружинного привода с выходным поворотным звеном 1, где перемещение осуществляется с помощью пружины 2, а пневмоцилиндр служит для компенсации диссипативных потерь. Данная схема позволяет

получить меньшие габаритные размеры за счет крепления пневматического цилиндра и пружины к основанию по одну сторону по отношению к точке крепления поворотного звена.

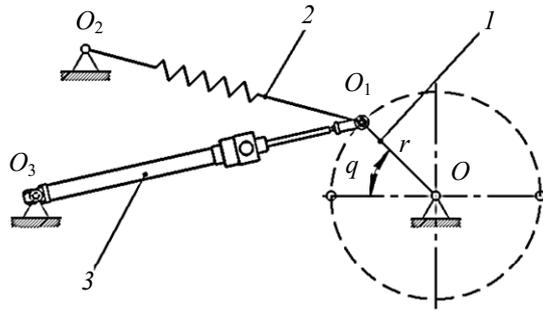


Рис. 2

На рис. 3 представлена схема пружинного аккумулятора, в котором выходное поворотное звено 1 соединено с пружиной 2 через гибкий элемент 4 с помощью блоков 3. Использование гибкого элемента обеспечивает наилучшее приближение к синусной моментной характеристике привода.

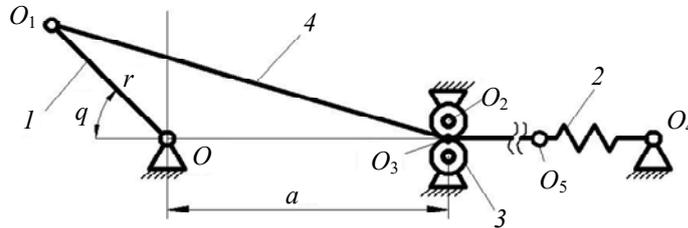


Рис. 3

Схема нереверсивного пружинного привода (рис. 4, 1 — выходное звено, 2 — пружина, 3 — пневмоцилиндр) позволяет приблизиться к синусной моментной характеристике без использования дополнительных компонентов, таких как ролики и гибкий элемент.

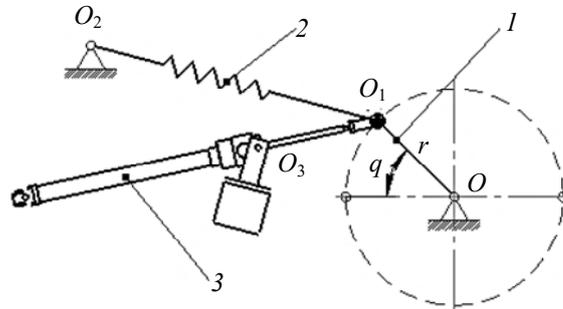


Рис. 4

Для создания экспериментальной установки выбрана схема пружинного привода, представленная на рис. 2. Основными характеристиками пружинного аккумулятора являются потенциальная энергия, момент и усилие пружины, для определения которых даны формулы в безразмерном виде [3, 4]:

$$V_T = \frac{1}{2} c \left(\sqrt{1 + a^2 + 2ar \cos q} - (a - 1) \right)^2,$$

$$M = a \left(1 - \frac{a - r}{\sqrt{r^2 + a^2 + 2ar \cos q}} \right) \cdot \sin q,$$

$$P_{пр} = c \left(\sqrt{1 + a^2 + 2ar \cos q} - a + 1 \right).$$

На рис. 5 представлен график зависимости момента от угла поворота выходного поворотного звена.

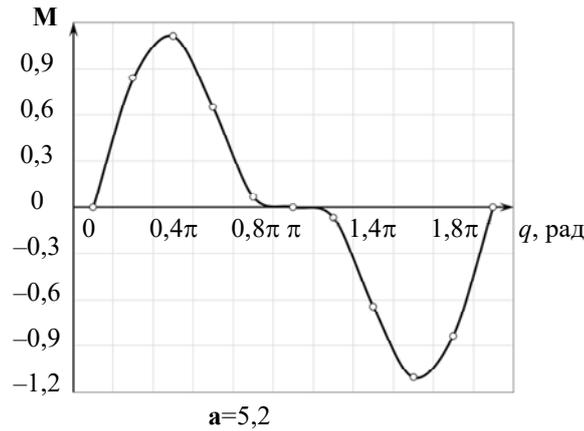


Рис. 5

Алгоритм работы разрабатывался для кинематической схемы пружинного привода, представленной на рис. 6 (1 — выходное звено, 2 — пружина, 3 — пневмоцилиндр, 4 — индукционный датчик, 5 — пневмораспределитель 5/3, 6 — пневмораспределитель 3/2, 7 — система управления).

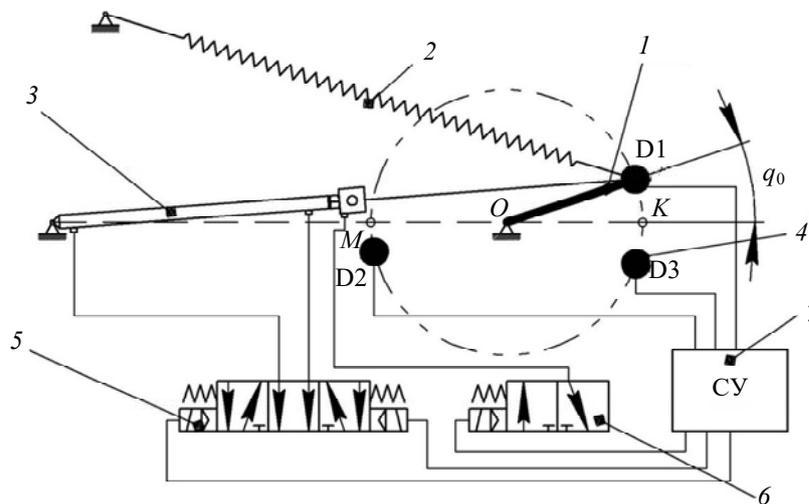


Рис. 6

Выходное звено смещено на угол q_0 для обеспечения требуемого направления движения. После нажатия кнопки „старт“ поступает сигнал на отключение тормоза и механизм приводится в движение. Под действием усилия пружины поворотное звено проходит 1-й участок до датчика D2 и преодолевает точку устойчивого положения M. Далее от системы управления поступает сигнал на включение пневмоцилиндра, и поворотное звено проходит 2-й участок до датчика D3. Датчик D3 отключает пневмоцилиндр, и поворотное звено проходит 3-й участок до датчика D1, преодолевая точку неустойчивого положения K под действием сил инерции, приходит в стартовое положение и фиксируется. Далее цикл повторяется. Помимо управления пневмоцилиндром индукционные датчики фиксируют временные отрезки прохождения выходного поворотного звена (выводятся на управляющую панель).

Разработанная экспериментальная установка позволяет исследовать два типа мехатронных приводов:

- 1) пружинные приводы с рекуперацией энергии и с пневматическими цилиндрами для компенсации диссипативных потерь;
- 2) пневматический привод с одним цилиндром и с различными законами вращательного или возвратно-вращательного движения.

На рис. 7 представлен общий вид экспериментальной установки для исследования шагового пружинного привода с рекуперацией энергии.

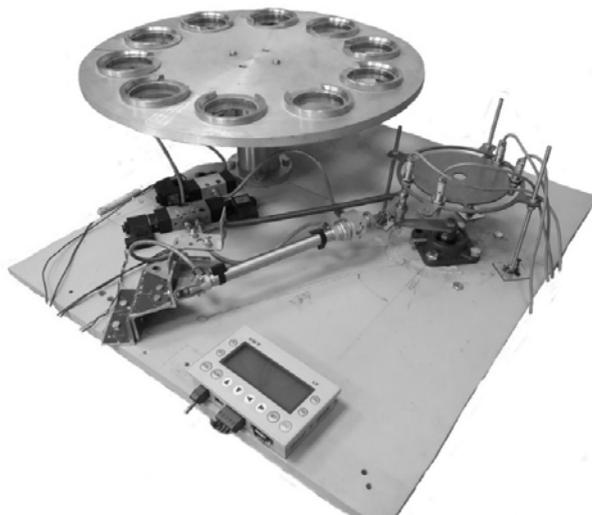


Рис. 7

Для расположения индукционных датчиков был разработан кронштейн (рис. 8), его конструкция позволяет легко выполнять быструю настройку режима работы механизма путем перемещения датчиков вдоль пазов. Дополнительно в кронштейне выполнено центральное технологическое отверстие для обеспечения соосного расположения с выходным звеном.

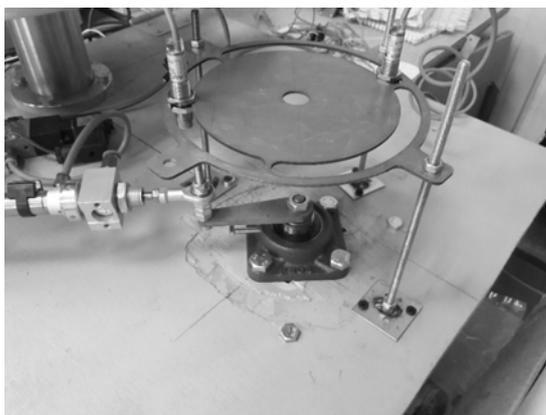


Рис. 8

Работоспособность пружинных приводов подтверждена испытанием экспериментального образца шагового привода. Показана возможность измерения временных отрезков между характерными точками законов движения двух типов приводов и выполнен их сравнительный анализ.

Результаты работы могут найти применение в механизмах конвейерного типа и в поворотных столах, работающих в шаговом режиме.

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., 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. Пелупесси Д. С., Жавнер М. В. Пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном // Изв. Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 1(2). С. 256—259.
4. Пелупесси Д. С., Жавнер М. В. Пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном для шаговых перемещений // Изв. вузов. Машиностроение. 2016. № 10(679). С. 9—17.

5. Жавнер М. В. Методы расчета и проектирования исполнительных устройств робототехнических систем на базе пружинных механизмов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2003. 18 с.
6. Zhavner V. L., Matsko O. N., Zhavner M. V. Comparative Analysis of Mechatronic Drives for Reciprocal Motion // Intern. Review of Mechanical Engineering (I.RE.ME.). 2018. Vol. 9, N 12. P. 784—789.
7. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
8. Подураев Ю. В., Кулешов В. С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 1. С. 5—10.
9. 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.
10. 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.
11. Жавнер М. В. Моментные характеристики пружинных аккумуляторов с выходным поворотным звеном // 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.
12. Жавнер М. В. Законы движения пружинных приводов на базе пружинных аккумуляторов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2018. № 5. С. 645—653.
13. 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.
14. Zhavner V. L., Matsko O. N. Spring drives for reciprocal motion // J. of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. N 1. P. 1—5.

Сведения об авторах**Игорь Вячеславович Лазарев**— аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа машиностроения;
E-mail: igor-lazarevv-1994@mail.ru**Милана Викторовна Жавнер**— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа машиностроения;
E-mail: milanaj@mail.ruПоступила в редакцию
03.02.2020 г.**Ссылка для цитирования:** Лазарев И. В. Жавнер М. В. Исследование нереверсивного шагового привода с рекуперацией энергии // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 338—344.**RESEARCH OF A NON-REVERSIBLE STEP DRIVE WITH ENERGY RECOVERY****I. V. Lazarev, M. V. Zhavner***Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251, St. Petersburg, Russia
E-mail: milanaj@mail.ru*

Non-reversible step drives with a spring accumulator are considered, which allow reducing energy consumption when performing technological processes. Kinematic schemes of the step drive layout are analyzed, optimal designs of control units are selected, and an experimental installation of a non-reversible step drive with energy recovery is developed. Tests of a non-reversible step drive carried out with the use of the experimental installation makes it possible to compare previously obtained theoretical data with the experimental results. A comparative analysis of the time indicators of a pneumatic step drive and a drive with energy recovery is carried out. The obtained results demonstrate that the use of a spring battery can significantly reduce energy costs, and therefore application of spring drives is economically advantageous in the industrial sphere.

Keywords: rotary table, spring batteries, energy recovery, step drive, non-reversible drive

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. 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.)
4. Pelupessi D.S., Zhavner M.V. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2016, no. 10(679), pp. 9–17. (in Russ.)
5. Zhavner M.V. *Metody rascheta i proyektirovaniya ispolnitel'nykh ustroystv robototekhnicheskikh sistem na baze pruzhinnykh mekhanizmov* (Methods of Calculation and Design of Actuators of Robotic Systems Based on Spring Mechanisms), Extended abstract of candidate's thesis, St. Petersburg, 2003, 18 p. (in Russ.)
6. 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.
7. Podurayev Yu.V. *Mekhatronika: osnovy, metody, primeniye* (Mechatronics: Fundamentals, Methods, Application), Moscow, 2006, 256 p. (in Russ.)
8. Podurayev Yu.V., Kuleshov V.S. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2000, no. 1, pp. 5–10. (in Russ.)
9. Zhavner V.L., Matsko O.N., Zhavner M.V., Zhao Wen. *Mekhatronnyye pruzhinnyye privody s rekuperatsiyey energii v tekhnologicheskoy oborudovaniy* (Mechatronic Spring Drives with Energy Recovery in Technological Equipment), St. Petersburg, 2019, 77 p. (in Russ.)
10. Zhavner V.L., Matsko O.N. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i Obrazovaniye*, 2014, no. 4, pp. 513–521. (in Russ.)
11. 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.)
12. Zhavner M.V. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i Obrazovaniye*, 2018, no. 5, pp. 645–653. (in Russ.)
13. 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.)
14. Zhavner V.L., Matsko O.N. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, no. 1, pp.1–5.

Data on authors

- Igor V. Lazarev** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Mechanical Engineering; E-mail: igor-lazarev-1994@mail.ru
- Milana V. Zhavner** — PhD; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Mechanical Engineering; E-mail: milanaj@mail.ru

For citation: Lazarev I. V., Zhavner M. V. Research of a non-reversible step drive with energy recovery. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 4. P. 338–344 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-338-344