

УДК 621.01

ПРУЖИННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ С ВЫХОДНЫМ ПОВОРОТНЫМ ЗВЕНОМ

© 2016 Д.С. Пелупесси, М.В. Жавнер

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Статья поступила в редакцию 30.03.2016

В статье рассмотрены пружинные аккумуляторы, их характеристики и области применения. Рассматриваются пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном, предназначенные для шаговых приводов с рекуперацией энергии.

Ключевые слова: пружинные аккумуляторы, потенциальная энергия, рекуперация, быстроедействие

Пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном используются в приводах с рекуперацией энергии для шаговых перемещений и уравнивающих устройств. Несмотря на значительное снижение затрат энергии и благоприятные динамические режимы в пружинных приводах этого типа, отсутствует прорыв в их использовании. Хотя известны работы, посвящённые этим приводам, последние не находят реального воплощения в конструкторских разработках. В то же время на рынке комплектующих элементов присутствует большое количество изделий, которые могут быть использованы при создании пружинных приводов для шаговых перемещений. Другой областью применения пружинных аккумуляторов являются испытательные машины для определения срока службы и надёжности элементов машин, например, зубчатых ремней, зубчатых и цепных передач. В этом случае при рабочей нагрузке на испытываемые детали затраты энергии будут снижены, по крайней мере, на порядок по сравнению с затратами энергии в типовых испытательных стендах. Необходимо отметить, что в технической литературе отсутствует информация о характеристиках пружинных аккумуляторов и методиках их расчёта.

В настоящей работе рассматриваются пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном, выполняющие функцию двигателя с жёсткой силовой характеристикой в приводах для шаговых перемещений. Использование пружинных аккумуляторов с выходным поворотным звеном в приводах с рекуперацией энергии для шаговых перемещений позволяет снизить затраты энергии в 5-10 раз [2] по сравнению с традиционными шаговыми приводами. Пружинные приводы обладают высоким быстродействием и отличаются повышенной надёжностью. Нелинейные пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном и углом поворота 2π представлены на рис. 1 и 2. На рис. 1 показан нелинейный пружинный аккумулятор с выходным поворотным звеном 1, шарнирно соединённый с цилиндрической пружиной растяжения 2. Второй конец пружины соединен с основанием. При вращении вокруг оси O , точка O_1 проходит угол $q = 2\pi$. На рис. 2 представлен аналогичный нелинейный пружинный аккумулятор, в котором применена пружина сжатия.

Основными характеристиками пружинных аккумуляторов с выходным поворотным звеном являются:

1. Закон изменения потенциальной энергии в зависимости от угла поворота.
2. Зависимость усилия пружины от угла поворота выходного звена.
3. Жёсткость и максимальное усилие пружины.
4. Приведённый к оси выходного звена момент трения в шарнирах.
5. Закон изменения движущего момента, который при постоянном приведённом моменте инерции, аналогичен по виду закону ускорения.
6. Зависимость скорости выходного звена от угла поворота.
7. Время поворота на заданный угол, при заданных моменте инерции и жёсткости пружины.

Знание этих характеристик позволяет конструктору осознанно выбирать те или иные пружинные аккумуляторы с учётом их основных характеристик и сравнительного анализа при конструировании пружинных приводов и уравнивающих устройств.

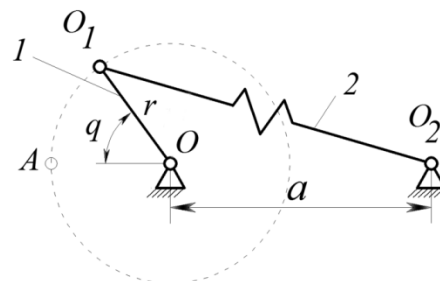


Рис. 1. Схема нелинейного пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном и пружиной растяжения

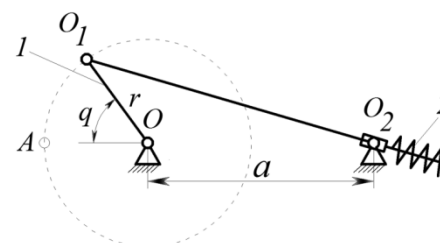


Рис. 2. Схема нелинейного пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном и с пружиной сжатия

Рассмотрим более подробно некоторые из этих характеристик. Момент, действующий на выходное звено, определяется выражением:

$$M = cL_{np}h \quad (1)$$

где h – плечо вращающего момента определяется по рис. 3 из соотношения:

$$ar \sin q = h \sqrt{r^2 + a^2 + 2ar \cos q} \quad (2)$$

Пелупесси Данни Самуел, аспирант. E-mail: pelupessy.d@yandex.ru
Жавнер Милана Викторовна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: zhavner_mv@spbstu.ru

Для пружинных аккумуляторов, представленных на рис. 1 и 2, выходная моментная характеристика определяется следующим выражением:

$$M = acr \sin q \left(1 - \frac{a-r}{\sqrt{r^2 + a^2 + 2ar \cos q}} \right) \quad (3)$$

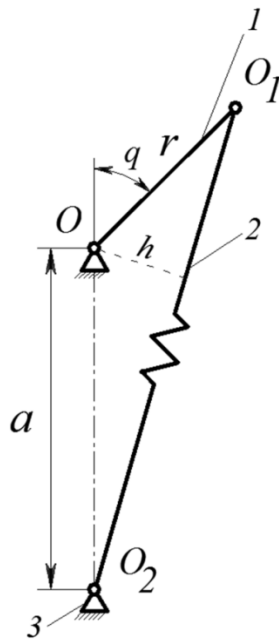


Рис. 3. Схема пружинного аккумулятора для определения геометрических характеристик

Для определения областей изменения межосевого расстояния, введем безразмерный коэффициент $a' = \frac{a}{r}$.

$$M = cr^2 \sin q \cdot M' \quad (4)$$

где $M' = a' \left(1 - \frac{a'-1}{\sqrt{1+a'^2 + 2a' \cos q}} \right)$ – уравнение, определяющее значение момента в безразмерном виде.

На рис. 4 в общем виде показано семейство моментных характеристик нелинейного пружинного аккумулятора при единичном значении радиуса поворотного звена при различных значениях межосевого расстояния, определяющих моменты на выходном звене. Необходимо отметить, что при увеличении межосевого расстояния амплитудное значение увеличивается и смещается к положению неустойчивого равновесия, при этом площадь, ограниченная каждой кривой, во всех случаях одинаковая – это и есть работа, которая равна максимальной потенциальной энергии.

Для сравнения различных видов пружинных аккумуляторов возьмём пружинный аккумулятор с синусной моментной характеристикой, представленный на рис. 5. Момент такого нелинейного пружинного аккумулятора определяется следующим выражением:

$$M = M_{\max} \sin q \quad (5)$$

Пружинный аккумулятор с такой характеристикой невозможно реализовать с углом поворота равным 2π по динамическим и конструктивным ограничениям. Однако грузовой аккумулятор позволяет реализовать привод с углом поворота равным 2π [6]. Пружинные аккумуляторы с синусной моментной характеристикой могут быть реализованы в системах уравнивания звеньев при их вертикальном расположении или при угле поворота $q < 2\pi$ [4].

Определим законы изменения потенциальной энергии для пружинных аккумуляторов, представленных на рис. 1 и 2.

Для рассматриваемых пружинных аккумуляторов с одним поворотным рычагом (рис. 1, 2) при одинаковой жесткости пружин c и радиусе поворота r , максимальная потенциальная энергия в положении неустойчивого равновесия равна:

$$V_{\max} = 2cr^2 \quad (6)$$

где c – жесткость пружины; $r=OO_1$ – радиус закрепления пружины на выходном звене; q – текущий угол поворота выходного звена.

Текущее значение потенциальной энергии определяется следующим выражением:

$$V = 0,5cL_{np}^2 \quad (7)$$

$$L_{np} = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin q} - L_0 \quad (8)$$

где $a=OO_2$ – расстояние между осями выходного звена и шарнирного соединения пружины с корпусом; L_0 – минимальная длина пружины,

$$a = r + L_0 \quad (9)$$

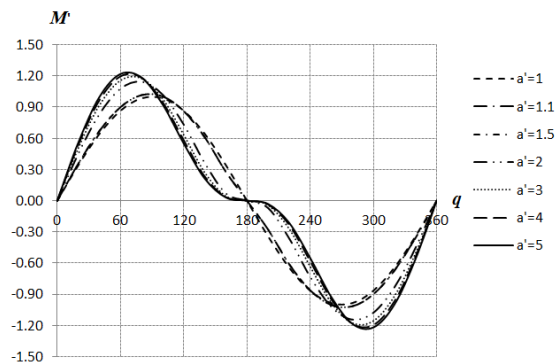


Рис. 4. Семейство моментных характеристик нелинейного пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном

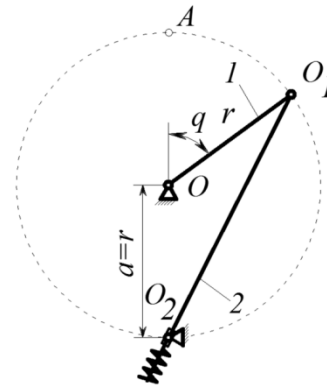


Рис. 5. Схема нелинейного пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном при $a = r$

Так как максимальное удлинение пружины в рассматриваемом пружинном аккумуляторе равно $2r$, то $L_0 = \frac{2r}{K_y}$, K_y – коэффициент удлинения пружины. Коэффициент удлинения пружины в стандартных цилиндрических пружинах лежит в пределах от 0,5 до 4 [3]. Тогда значения a будут изменяться от $1,5r$ до $5r$, а безразмерный параметр в пружинных аккумуляторах с пружинами растяжения $a' \in [1,5 \dots 5]$. Для пружин сжатия $a' \in [1,1 \dots 5]$.

С учётом уравнений (8), (9) уравнение (7), определяющее текущее значение потенциальной энергии, для пружинного аккумулятора примет вид:

$$V_m = \frac{c}{2} \left(\sqrt{r^2 + a^2 + 2ar \cos q} - L_0 \right)^2 \quad (10)$$

$$V_m = \frac{cr^2}{2} V'_m \quad (11)$$

где $V'_m = \left(\sqrt{1 + a'^2 + 2a' \cos q} - (a' - 1) \right)^2$ – уравнение, определяющее значение потенциальной энергии в безразмерном виде.

Текущее значение потенциальной энергии в зависимости от угла поворота для всех представленных выше схем будут определяться их конструктивными параметрами. Семейство графиков зависимости потенциальной энергии от угла поворота в общем виде представлено на рис. 6. Зависимость потенциальной энергии для синусного пружинного аккумулятора от угла поворота q определяется выражением:

$$V = 2cr^2 \cdot \cos^2 \frac{q}{2} \quad (12)$$

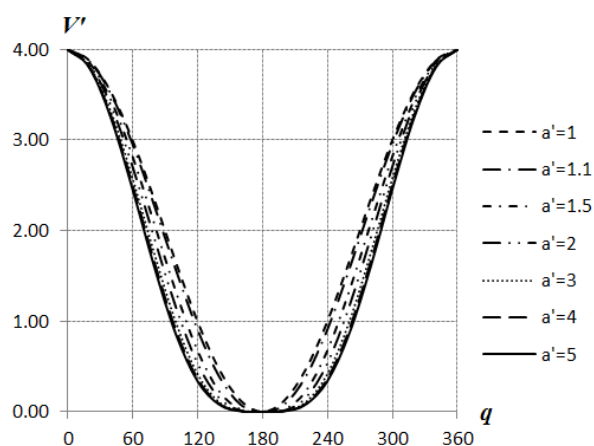


Рис. 6. Зависимость потенциальной энергии нелинейного пружинного аккумулятора от угла поворота: $V = f(q)$

Текущее значение усилия пружины, с учётом уравнений (8), (9) определяется следующим выражением:

$$P_{np} = cL_{np} \quad (13)$$

или

$$P_{np} = c \left(\sqrt{r^2 + a^2 + 2ar \cos q} - L_0 \right) \quad (14)$$

$$P_{np} = crP'_{np} \quad (15)$$

где $P'_{np} = \sqrt{1 + a'^2 + 2a' \cos q} - a' + 1$ – уравнение, определяющее значение усилия пружины в безразмерном виде.

Графики зависимости усилия пружины нелинейного пружинного аккумулятора от угла поворота представлены в общем виде на рис. 7.

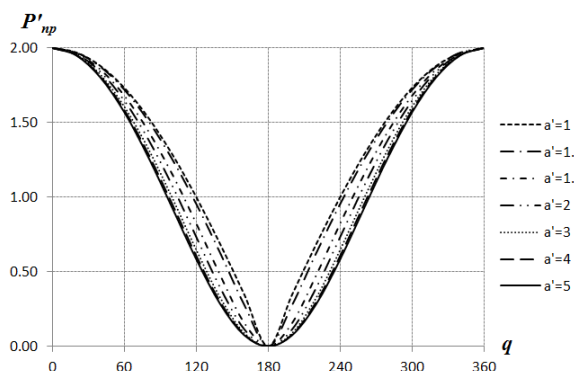


Рис. 7. Зависимость усилия пружины нелинейного пружинного аккумулятора от угла поворота: $P_{np} = f(q)$

Для определения скорости выходного звена запишем уравнение полной механической энергии НПА, без учёта диссипативных потерь:

$$V_{max} - V_m = \frac{J\dot{q}^2}{2} \quad (16)$$

Текущая угловая скорость определяется из уравнения (15) для полной механической энергии нелинейного пружинного аккумулятора и равна:

$$\dot{q} = \sqrt{\frac{2(V_{max} - V_m)}{J}} \quad (17)$$

Максимальная угловая скорость выходного звена имеет место при прохождении положения устойчивого равновесия и равна:

$$\dot{q} = \sqrt{\frac{2(2cr^2 - 0.5c(\sqrt{r^2 + a^2 + 2ar \cos q} - L_0)^2)}{J}} \quad (18)$$

$$\dot{q} = 2r \sqrt{\frac{c}{J}} \cdot \dot{q}' \quad (19)$$

где $\dot{q}' = \sqrt{1 - \frac{(\sqrt{1 + a'^2 + 2a' \cos q} - (a' - 1))^2}{4}}$ – уравнение, определяющее значение угловой скорости в безразмерном виде.

На рис. 8 в общем виде показано семейство графиков зависимости угловой скорости нелинейного пружинного аккумулятора от угла поворота. Зависимость угловой скорости выходного звена от угла поворота для синусного аккумулятора имеет вид:

$$\dot{q} = 2r \sqrt{\frac{c}{J}} \cdot \sin \frac{q}{2} \quad (20)$$

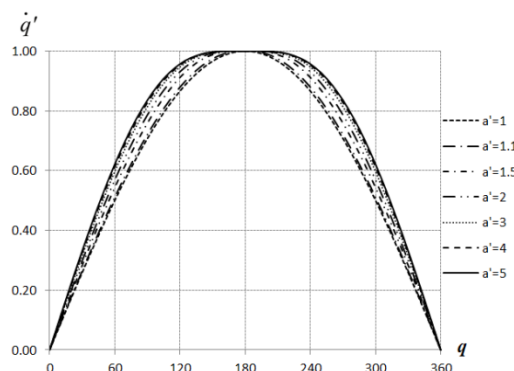


Рис. 8. Зависимость угловой скорости нелинейного пружинного аккумулятора от угла поворота: $\dot{q} = f(q)$

Рассмотрим, какие законы движения можно получить с помощью нелинейных пружинных аккумуляторов с выходным поворотным звеном. При угле поворота, равным 2π , можно получить или точный синусоидальный закон ускорения (грузовой аккумулятор), или синусоидальный закон, в котором скорость и ускорение меняются непрерывно, и свои изменения начинают и оканчивают нулевыми значениями. Время поворота для нелинейного пружинного аккумулятора на угол 2π определяется интегральным уравнением:

$$t = \int_0^{2\pi} \frac{dq}{\dot{q}(q)} \quad (21)$$

Это уравнение можно записать в виде

$$t = \int_0^{2\pi} \frac{dq}{\dot{q}(q)} = \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{J}{c}} \cdot K_{tq} \quad (22)$$

При решении данного интегрального уравнения для синусного аккумулятора в первом приближении получаем значение коэффициента $K_{tq} = 24,5$, для пружинного аккумулятора при $a' = 5$, получаем значение коэффициента $K_{tq} = 19,6$. Следует отметить, что

увеличение a' приводит к увеличению быстродействия и уменьшению времени поворота. Решение уравнения (22) позволяет определить время поворота и, следовательно, жесткость пружины. Изменения конструктивного параметра – длины рычага r позволяет уменьшать или увеличивать жесткость пружины.

При создании пружинных приводов основными параметрами являются момент инерции и требуемое время поворота. Знание основных характеристик позволяет конструктору осознанно выбирать те или иные пружинные аккумуляторы с учётом их основных характеристик и сравнительного анализа при конструировании шаговых приводов. В отношении плавности поворота пружинный привод на базе нелинейного пружинного аккумулятора с выходным поворотным звеном и углом поворота 2π является идеальным, так как скорость, так и ускорение меняются непрерывно, и своё изменение начинают и оканчивают нулевыми значениями. Применение пружинных аккумуляторов оправдано их малыми габаритами и высоким быстродействием.

Рассмотренные выше нелинейные пружинные аккумуляторы имеют рабочий угол поворота равный $q = 2\pi$. Такие пружинные аккумуляторы могут использоваться, как в приводах с компенсацией диссипативных потерь в процессе движения, так и в приводах с их предварительной компенсацией. В последнем случае в

положении устойчивого положения пружина должна иметь предварительный натяг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. А.с. 1544550 СССР. Резонансный привод / В.И. Бабицкий, А.А. Котлячков, В.А. Чечуров и др. Бюл. 1990. № 7.
2. Жавнер, М.В. Методы расчета и проектирования исполнительных устройств робототехнических систем на базе пружинных механизмов: Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2003. 18 с.
3. Жавнер, В.Л. Рекуперативные приводы для цикловых перемещений / В.Л. Жавнер, О.Н. Мацко, М.В. Жавнер. – Palmarium Academic Publishing, 2014. 90 с.
4. Корендяев, А.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. / А.И. Корендяев, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывес. – М.: Наука, 2006. 376 с.
5. Лойцянский, Л.Г. Курс теоретической механики. Том 2. Учебное пособие для вузов / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – М.: Наука, 1983. 621 с.
6. Феоктистова, Н.А. Гидромеханические рекуперативные приводы промышленных роботов для механизации погрузочно-разгрузочных работ: дис. ... канд. тех. наук. – СПб., 1988. 276 с.

SPRING ACCUMULATORS WITH THE OUTPUT ROTARY LINK

© 2016 D.S. Pelupessi, M.V. Zhavner

Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University

In article spring accumulators, their characteristics and scopes are considered. Spring accumulators with the output rotary link intended for stepper- drives with recuperation energy are considered.

Key words: *spring accumulators, potential energy, recuperation, high-speed performance*

Danny Pelupessi, Post-graduate Student. E-mail:

pelupessi.d@yandex.ru

Milana Zhavner, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor. E-mail: zhavner_mv@spbstu.ru