

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ПРУЖИННОГО АККУМУЛЯТОРА

Янь Чуаньчао, Ли Сэнь, Жавнер М.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Ключевые слова: пружинный аккумулятор, внутреннее трение, вынужденные колебания, свободные колебания, рекуперация энергии, энергосбережение, диссипативные потери.

Аннотация. В данной работе исследован способ и устройство для определения диссипативных потерь на внутреннее трение в пружинных аккумуляторах. Данное устройство реализовано на основе определения амплитуды затухания свободных колебаний. При разработке технологического оборудования на базе пружинных аккумуляторов интересуют потери на внутреннее трение в полупериоде, то есть величина дополнительной энергии, которую требуется добавить в колебательную систему во время движения из одного крайнего положения в другое. Определение величин двух последовательных амплитуд связано с трудностями, даже при очень низких частотах, так как последовательные амплитуды весьма близки по величине воздействия. При этом разработчиков пружинных приводов интересует конкретное значение потерь энергии за время полупериода, которое для пружинных аккумуляторов в практических условиях определить указанными выше методами с необходимой точностью не представляется возможным. Способ, позволяющий с помощью заявленного устройства для определения внутреннего трения в пружинах сжатия получить результат с высокой точностью, обладает минимальной трудоемкостью.

METHOD AND APPARATUS FOR DETERMINING THE INTERNAL FRICTION OF A SPRING ACCUMULATOR

Yan Chuanchao, Li Sen, Zhavner M.V.

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

Keywords: spring accumulator, internal friction, forced oscillation, free oscillations, energy recovery, laws of motion, output link, energy saving, dissipative losses.

Abstract. In this paper, a method and device for determining dissipative losses due to internal friction in spring accumulators are investigated. This device is implemented on the basis of determining the amplitude of attenuation of free oscillations. When developing technological equipment based on spring accumulators, the loss of internal friction in the half-life is of interest, that is, the amount of additional energy that needs to be added to the oscillatory system during movement from one extreme position to another. Determining the values of two consecutive amplitudes is difficult, even at very low frequencies, since the successive amplitudes are very close in magnitude of impact. At the same time, the developers of spring drives are interested in the specific value of energy losses during the half-life, which for spring batteries in practical conditions is not possible to determine by the above methods with the necessary accuracy. The method, which allows using the claimed device for determining internal friction in compression springs to obtain a result with high accuracy, has minimal labor intensity.

Введение

Энергетические затраты, потребляемые технологическим оборудованием, определяются работой, которая затрачивается на технологические операции и работой, определяемой потерями, связанной с диссипацией энергии.

Использование рекуперативных приводов в технологическом оборудовании позволяет снизить затраты энергии [1-6].

Суммарные потери на преодоление всех диссипативных сил в пружинных аккумуляторах складываются из работы привода на преодоление внутреннего трения в пружинах и работы привода на преодоление трения в шарнирных соединениях пружинного аккумулятора.

Существует 5 методов определения величины внутреннего трения [7-9]:

1) определение затухания амплитуды свободных колебаний;

2) определение петли гистерезиса кривой «напряжение-деформация» при вынужденных колебаниях;

3) измерение энергии, рассеиваемой при вынужденных колебаниях;

4) определение резонансной кривой при вынужденных колебаниях;

5) определение постоянных, характеризующих распространение звуковых волн.

Все эти методы, за исключением первого, связаны с вынужденными колебаниями, т.е. колебаниями, возбуждаемыми извне, когда восполнение потерь энергии на внутреннее трение, обеспечивает поддержание в системе установившегося режима. В пружинных приводах с рекуперацией энергии требуется поддерживать постоянную амплитуду колебаний.

Свободные колебания затухают с течением времени, вследствие энергетических потерь колебательной системой. В механических колебательных системах наличие трения приводит к тепловым потерям. На рисунке 1 показана кривая свободных затухающих колебаний груза массой m , свободно подвешенного на пружине.

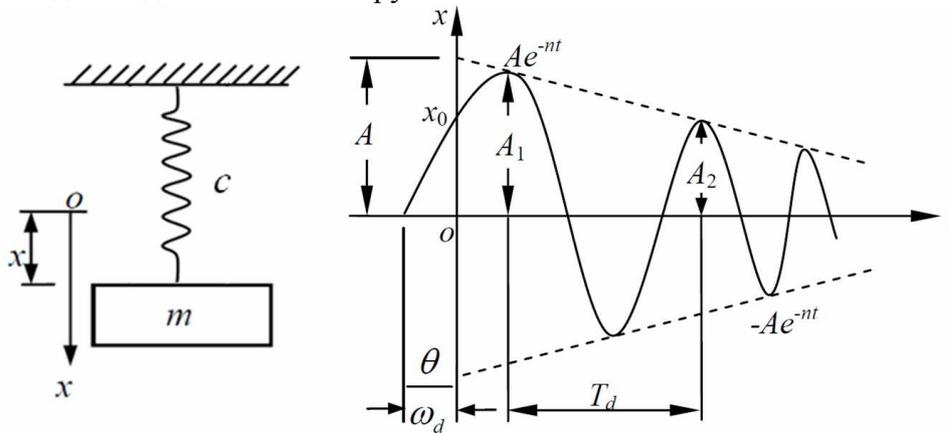


Рис. 1. Кинематическая схема груза массой m , свободно подвешенного на пружине и кривая свободных затухающих колебаний

Энергия такой колебательной системы определяется по формуле:

$$E = \frac{cx^2}{2} + \frac{m\dot{x}^2}{2} = E_0 e^{-2nt},$$

где c – жесткость пружины; x – перемещение; \dot{x} – скорость; E_0 – начальная энергия; n – коэффициент затухания; t – время.

Величину диссипативных потерь, которую необходимо компенсировать в следующем цикле движения, определяют по формуле:

$$\Delta E = E_0 (e^{-2nt} - e^{-2n(t+T)}),$$

где T – период колебаний.

Амплитуда затухающих колебаний зависит от времени. Частота и период колебаний зависят от степени затухания колебаний.

Разработчиков пружинных аккумуляторов интересуют потери на внутреннее трение только в полупериоде, то есть величина дополнительной энергии, которую он должен добавить в колебательную систему за время движения из одной крайней точки в другую.

Определение величин двух последовательных амплитуд связано с известными трудностями, даже при очень низких частотах, так как последовательные амплитуды весьма близки по величине воздействия. При этом разработчиков пружинных приводов интересует конкретное значение потерь энергии за время полупериода, которое для пружинных аккумуляторов в практических условиях определить указанными выше методами с необходимой точностью не представляется возможным.

Разработка устройства для определения потерь на внутреннее трение в пружинных аккумуляторах на основе патента на изобретение [10], полученного авторами, позволит реализовать простой и надежный способ для их определения.

Авторское решение

Указанный выше технический результат достигается за счет того, что способ для определения внутреннего трения пружинного аккумулятора, заключается в том, что пружины испытуемого пружинного аккумулятора размещают между опорными поверхностями из условия направления усилий пружин навстречу друг другу, получая таким образом два равных по характеристикам звена. Извне прилагают усилие на одно из звеньев пружинного аккумулятора для сжатия его и накопления в нем потенциальной энергии, за счет которой после окончания приложения усилия и передаче ее второму звену и обратно заставляют пружинный аккумулятор совершать гармонические колебания, затухающие под действием сил внутреннего. При колебаниях измеряют величины взаимного линейного перемещения соприкасающихся торцов пружин звеньев пружинного аккумулятора.

Устройство для определения внутреннего трения пружинного аккумулятора состоит из корпуса, с нижнего торца которого смонтирован пневмоцилиндр для приложения внешнего усилия на звено пружинного аккумулятора. Корпус разделен поперек на две части неподвижной перегородкой. В нижней части корпуса, прилегающей к пневматическому цилиндру смонтирован возвратный механизм штока пневмоцилиндра, выполненный в виде пружины сжатия. Пружина одним торцом опирается на пластину, смонтированную на конце штока, а другим на неподвижную перегородку. В верхней части корпуса между перегородкой и дистальным концом корпуса смонтирован пружинный аккумулятор, состоящий из двух одинаковых звеньев, опирающихся встречными торцами на опорную пластину, смонтированную на удлинителе штока, при этом между корпусом пневмоцилиндра и опорной пластиной смонтирован линейный потенциометр, выполненный с возможностью измерения хода опорного звена. Линейный потенциометр подключен к блоку управления для управления устройством через распределитель, вход которого подключен к блоку подготовки воздуха, а выход к пневматическому цилиндру, снабженный датчиками положения штока, подключенными к блоку управления.

Рассмотрим конструкцию устройства более подробно.

Устройство для определения потерь на внутреннее трение в пружинном аккумуляторе (рис. 2) состоит из корпуса устройства, пневмоцилиндра 1, возвратного механизма, опорного звена 10, линейного потенциометра 13, блока управления 15. Пневматический цилиндр 1 выполнен с возможностью обеспечения приложения внешнего усилия на пружинный аккумулятор для совершения им гармонических затухающих колебаний. Корпус устройства образован торцевыми стенками, функцию которых выполняют фланец 5, смонтированный соосно на корпусе пневмоцилиндра 1 со стороны штока 2, и верхний неподвижный диск 8, смонтированный соосно с фланцем 5 с помощью опорных направляющих 6, установленных вдоль штока 2, выполняющих роль боковых стенок корпуса устройства и образующих ребра жесткости корпуса устройства.

Корпус устройства разделен поперек на две части нижним неподвижным диском 7. В нижней части корпуса смонтирован возвратный механизм, представляющий собой возвратную пружину сжатия 9, установленную на штоке пневмоцилиндра. Для устойчивости положения возвратной пружины 9 на штоке 2 соосно смонтирован подвижный диск 3, выполненный с возможностью возвратно-поступательного перемещения вдоль направляющих 6 вместе со штоком 2. Для удержания возвратной пружины 9 от продольного смещения на нижнем неподвижном диске и подвижном диске 3 в обращенных друг другу сторонах выполнены ниши (рис. 3, 4), в которых размещается упомянутая пружина 9 своими торцевыми сторонами. Для скольжения подвижного диска 3 вдоль опорных направляющих 6 в нем выполнены сквозные отверстия, соосно направляющим 6, выполненных в виде шпилек.

Над подвижным диском 3 на штоке 2 соосно смонтирован удлинитель 4, проходящий через отверстие в нижнем неподвижном диске 7 в верхнюю часть корпуса.

Верхняя часть корпуса устройства предназначена для размещения в ней пружинного аккумулятора. Для этого с торца удлинителя 4 сверху с помощью гайки смонтировано опорное звено 10 испытуемого пружинного аккумулятора, выполненное в виде пластины.

Испытуемый пружинный аккумулятор размещается в верхней части корпуса устройства и образован двумя пружинами с одинаковыми размерами.

Пружина 11 установлена между нижним неподвижным диском 7 и опорным звеном 10, а пружина 12 смонтирована между опорным звеном 10 и верхним неподвижным диском 8. Для предотвращения продольного смещения пружин на нижнем 7, верхнем 8 неподвижных дисках и опорном диске 10 выполнены поднутрения, в которых устанавливаются пружины 11 и 12.

Между фланцем 5 и опорным звеном 10 смонтирован линейный потенциометр 13, выполненный с возможностью измерения хода опорного звена 10.

Шток 2 пневмоцилиндра 1 снабжен двумя датчиками положения 14. Выход линейного потенциометра 13 и датчики положения 14 подключены к блоку управления 15, выполненному с возможностью регистрации данных, получаемых от линейного потенциометра 13, датчиков положения 14 штока 2 и управления по заданному в блоке управления 15 алгоритму распределителем 16, подключенным к пневматическому цилиндру 1. Ко входу распределителя 16 подключен блок подготовки воздуха 17.

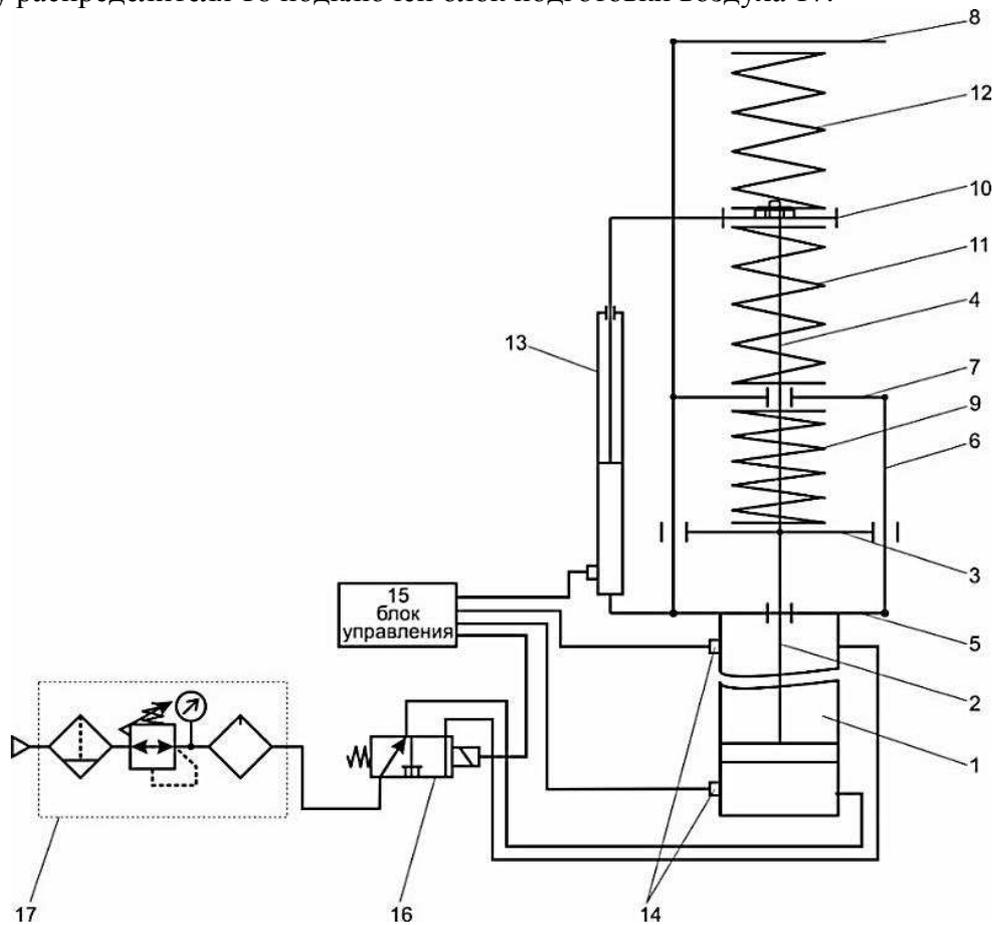


Рис. 2. Схема устройства для определения потерь на внутреннее трение в пружинном аккумуляторе

На рисунке 5 показана 3D-модель устройства для определения потерь на внутреннее трение в пружинном аккумуляторе.

Выбор в качестве торцевых стенок корпуса устройства фланца 5 и верхнего неподвижного диска 8 и в качестве неподвижной перегородки нижнего неподвижного диска 7 обосновывается тем, что форма указанных конструктивных элементов обеспечивает лучшее центрирование относительно штока. Упомянутые элементы могут быть любой формой. Главное их назначение – обеспечить взаимную соосность возвратной пружины 9, пружин 11 и 12 и штока пневмоцилиндра.

Рассмотрим порядок определения потерь на внутреннее трение в пружинном аккумуляторе, каждое из звеньев 11, 12 которого образованы одной пружиной.

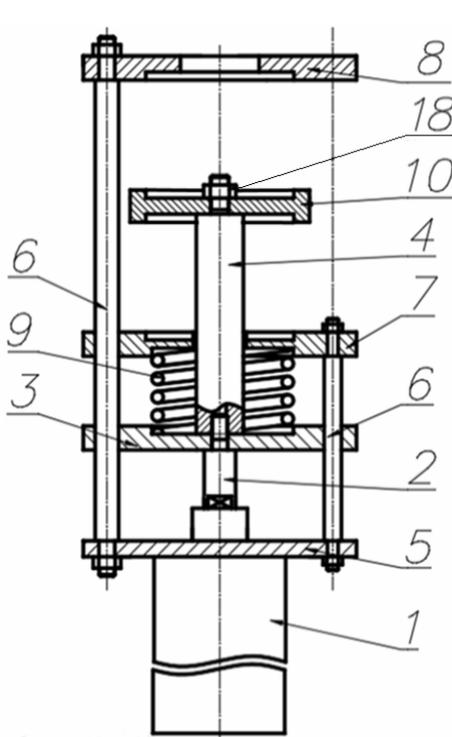


Рис. 3. Чертеж устройства для определения потерь на внутреннее трение в пружинном аккумуляторе (без испытуемых пружин)

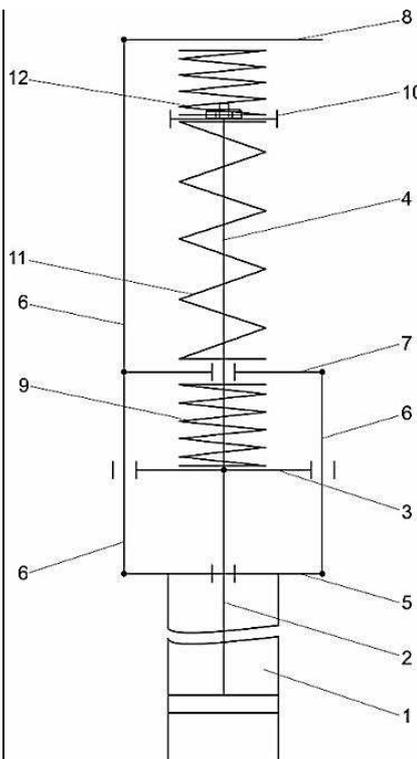


Рис. 4. Схема устройства для определения потерь на внутреннее трение в пружинном аккумуляторе при подаче воздуха в пневмоцилиндр

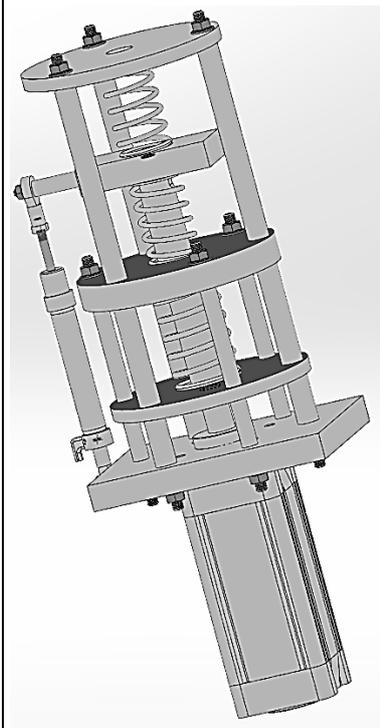


Рис. 5. 3D-модель устройства для определения потерь на внутреннее трение в пружинном аккумуляторе

Из блока управления 15 на пневматический распределитель 16 подают управляющий сигнал на подачу сжатого воздуха от источника воздуха через блок подготовки воздуха 17 в бесштоковую полость пневмоцилиндра 1. При подаче сжатого воздуха начинается движение штока 2 и смонтированных на нем опорного звена 10 и удлинителя 4. Для начала измерений снимают гайку 18, тем самым освобождают опорное звено 10 от удлинителя 4, на которое перестает действовать усилие штока 2. Освободившись, опорное звено 10 за счет того, что второе звено 12, находившееся до этого момента времени в сжатом положении за счет действующего усилия штока 2, разжимается и передает накопленную потенциальную энергию пружине 11, сжимая ее, а та в свою очередь после сжатия разжимается и передает накопленную потенциальную энергию обратно пружине 12, то есть пружинный аккумулятор совершает гармонические колебания, затухающие под действием сил внутреннего трения пружинного аккумулятора и сопротивления воздуха. После снятия гайки 18, с блока управления 15 подается сигнал на распределитель 16 для возврата штока 2 в нижнее положение за счет возвратной пружины 9 для того, чтобы тот не препятствовал колебаниям пружинного аккумулятора.

Неподвижность системы обеспечивается при условии:

$$P_{ц} = P_9 + P_{12},$$

где $P_{ц}$ – усилие, действующее на поршень пневмоцилиндра 1 от подачи сжатого воздуха в поршневую полость; P_9 – усилие, действующее на шток 2 пневмоцилиндра 1 от возвратной пружины 9; P_{12} – усилие, действующее на шток пневмоцилиндра от второй пружины 12.

При подаче воздуха в поршневую полость пневмоцилиндра 1 получают две отдельные подвижные системы. Первая система – это пружинный аккумулятор, состоящий из пружин 11 и 12 и опорного звена 10, вторая система – удлинитель 4, подвижный диск 3 и шток 2 с поршнем пневмоцилиндра.

$$\Delta U_{II} = \Delta U - U_{III} = U_{\max} - U_1 - F_{III}(h_1 + h_2) = c(h_1^2 - h_2^2) - F_{III}(h_1 + h_2),$$

где U_{III} – потери, обусловленные силой внутреннего трения линейного потенциометра.

Выводы

Реализация данного устройства позволит определять диссипативные потери на внутреннее трение в пружинных аккумуляторах. В ближайшее время планируется создание макета для проведения испытаний подобранных пружин и получение результатов с высокой точностью при минимальных трудозатратах.

Список литературы

1. Корендясев А.И., Саламандра Б.Л., Тывес Л.И. Теоретические основы робототехники. В 2 кн. – М.: Наука. – 2006.
2. Wen Zhao, Li Sen, Zhavner M.V. Mechatronic spring drives for rod borehole pumps // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024, vol. 374, pp. 377-386.
3. Надеждин И.В. Исполнительные механизмы цикловых машин-автоматов и мехатронных систем. – Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 280 с.
4. Надеждин И.В., Мочанов А.А. Экспериментальные исследования динамики мехатронных загрузочных устройств с рекуперацией энергии // Фундаментальные основы механики. – 2017. – №2. – С. 54-58.
5. Zhavner V.L., Matsko O.N. Spring drives for reciprocal motion // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2016, vol. 45, pp. 1-5.
6. Белогур В.П., Жавнер В.Л., Жавнер М.В., Чжао В. Мехатронные пружинные приводы для штанговых глубинных насосов // Современные проблемы теории машин. – 2022. – № 14. – С. 24-32.
7. Вульфсон И.И. Краткий курс теории механических колебаний. – М.: ВНТР, 2017. – 241 с.
8. Тавтилов И.Ш., Юршев В.И., Кириленко А.С. Основы теории трения и изнашивания: учебное пособие. – Оренбург: ОГУ, 2021. – 192 с.
9. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. – М.: Наука, 1991. – 256 с.
10. Патент №2813756 РФ. Способ и устройство для определения внутреннего трения пружинного аккумулятора // Янь Чуаньчао, Ли Сэнь, М.В. Жавнер. – Заявка №2023123452 от 20.09.2023; опубл.16.02.2024, Бюл. № 5.

References

1. Korendyasev A.I., Salamander B.L., Tyves L.I. Theoretical foundations of robotics. In 2 book. – M.: Science. – 2006.
2. Wen Zhao, Li Sen, Zhavner M.V. Mechatronic spring drives for rod borehole pumps // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024, vol. 374, pp. 377-386.
3. Nadezhdin, I.V. Executive mechanisms of cyclic automatic machines and mechatronic systems. – Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 280 p.
4. Nadezhdin I.V., Mochanov A.A. Experimental studies of the dynamics of mechatronic loading devices with energy recovery // Fundamentals of mechanics. 2017, no. 2, pp. 54-58.
5. Zhavner V.L., Matsko O.N. Spring drives for reciprocal motion // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2016, vol. 45, pp. 1-5.
6. Belogur V.P., Zhavner V.L., Zhavner M.V., Zhao Wen. Mechatronic spring drives for rod depth pumps // Modern problems of the theory of machines. 2022, no. 14, pp. 24-32.
7. Wolfson I.I. A short course in the theory of mechanical vibrations. – M.: VNTR, 2017. – 241 p.
8. Tavtilov I.Sh., Yurshev V.I., Kirilenko A.S. Fundamentals of the theory of friction and wear / textbook. – Orenburg: OGU, 2021. – 192 p.
9. Panovko Ya.G. Introduction to the theory of mechanical vibrations. – M.: Science, 1991. – 256 p.
10. Patent No. 2813756 RU. Method and apparatus for determining the internal friction of a spring accumulator / C. Yan, S. Li, M.V. Zhavner. – Appl. No. 2023123452 from 20.09.2023; publ. 16.02.2024, Bul. No. 5.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Янь Чуаньчао – аспирант	Yan Chuanchao – postgraduate student
Ли Сэнь – аспирант	Li Sen – postgraduate student
Жавнер Милана Викторовна – кандидат технических наук, доцент	Zhavner Milana Viktorovna – candidate of technical sciences, associate professor
milanaj@mail.ru	

Получена 11.06.2024