

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАЗМОТКИ И ПРОТЯГИВАНИЯ РУЛОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДИСКРЕТНОМ РЕЖИМЕ

В. Л. ЖАВНЕР, ВЭНЬ ЧЖАО, ЛУН У

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
195251, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: wenfly2015@yandex.ru*

Исследовано мехатронное устройство для размотки и протягивания рулонных материалов в дискретном режиме. Для уменьшения затрат энергии использован пружинный привод с рекуперацией энергии, в котором установлен пневматический цилиндр для компенсации диссипативных потерь. Традиционно такие пружинные приводы применяются для возвратно-поступательных перемещений рабочих органов с постоянной массой. Особенностью операции по размотке рулонных материалов в дискретном режиме является изменение приведенной к пружинному приводу массы рулона. Установлены законы изменения масс и предложен алгоритм, позволяющий программным способом изменять время отключения пневматического цилиндра для обеспечения максимальной требуемой скорости каретки в среднем положении. При этом возникает свободный выбег рулона и упаковочный материал разматывается, и вдоль трассы провисает лента. Дальнейшие циклы работы выполняются в режиме холостого хода с минимальными затратами энергии. Изменение массы контролируется с учетом количества циклов и программно задается уменьшение массы на конкретную величину. Результаты работы использованы при разработке мехатронной пневматической системы приводов фасовочно-упаковочного автомата. Результатами работы могут воспользоваться разработчики энергосберегающего технологического оборудования.

**Ключевые слова:** мехатронное устройство, рулон, рекуперация энергии, переменная инерционная нагрузка, пружинный аккумулятор, пневматический цилиндр, диссипативные потери

**Введение.** Снижение энергопотребления технологическим оборудованием остается первостепенной задачей. Имеется обширный круг задач, в которых рабочие органы совершают возвратно-поступательные перемещения с большими энергетическими затратами, обусловленными разгоном и торможением рабочих масс (элементов машин). При этом с повышением производительности, например, в два раза, затраты энергии увеличиваются в четыре раза, а требуемая мощность двигателя в восемь раз [1, 2]. Затраты энергии можно уменьшить использованием мехатронных пружинных двигателей с рекуперацией энергии [2—6]. В работах [7, 8] рассмотрены вопросы использования мехатронных пружинных приводов для автоматизации загрузочных и вспомогательных операций. Анализ публикаций показывает, что применение таких приводов ограничивается рабочими операциями с постоянными массами. В настоящей работе рассматривается мехатронное устройство, предназначенное для размотки и протягивания рулонных материалов в дискретном режиме. Существенными особенностями

этого привода являются применение мехатронного пружинного привода с рекуперацией энергии и уменьшение момента инерции рулона с упаковочным материалом в процессе работы и отсутствие тормоза, обеспечивающего постоянное натяжение упаковочного материала.

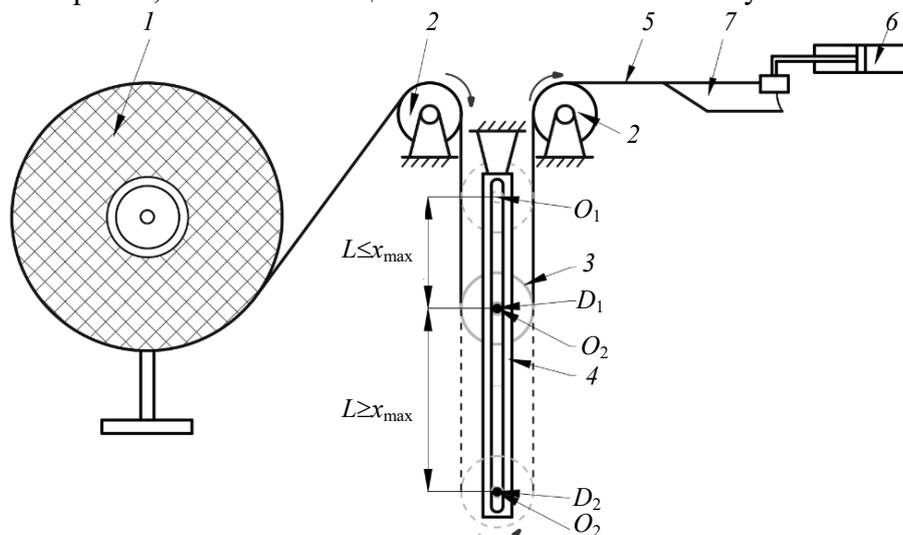


Рис. 1

На рис. 1 представлена схема устройства для размотки и протягивания рулонного материала (1 — рулон, 2 — направляющий ролик, 3 — натяжной ролик, 4 — направляющая, 5 — упаковочный материал, 6 — пневмоцилиндр, 7 — формирователь пакета).

Отметим следующие особенности устройства:

— переменный момент инерции рулона  $J$ , так как в процессе работы уменьшается и радиус рулона  $R$ , и его масса  $m$  — с каждым циклом на величину, равную массе протягиваемого за один цикл материала;

— отсутствует тормоз, который в типовых устройствах обеспечивает постоянное натяжение упаковочного материала, поэтому возможны следующие конфигурации упаковочного материала: (1) с постоянным натяжением упаковочного материала; (2) длина провисающего материала обеспечивает режим работы устройства при неподвижном рулоне; (3) работа начинается при неподвижном рулоне, сначала упаковочный материал натягивается, а затем начинается вращение рулона.

Когда ось натяжного ролика находится в точке  $O_1$ , упаковочный материал натянут, а рулон неподвижен. При включении привода имеем режим работы с инерционной нагрузкой, зависящей от текущего значения момента инерции рулона.

Если ось натяжного ролика находится между точками  $O_1$  и  $O_2$ , требуется обеспечить разгон рулона с упаковочным материалом до угловой скорости, при которой линейная скорость сбегавшего с него упаковочного материала станет равна линейной скорости каретки привода. В этом случае инерционная нагрузка возникает не сразу.

Если ось натяжного ролика расположена между точками  $O_2$  и  $O_3$ , переменная инерционная нагрузка отсутствует, так как в процессе протягивания упаковочного материала рулон неподвижен, а ось натяжного ролика поднимается по вертикали на величину, равную половине рабочего хода устройства. Работа без инерционной нагрузки происходит до тех пор, пока ось натяжного ролика не окажется выше точки  $O_2$ .

Для снижения затрат энергии на разгон и протягивание упаковочного материала целесообразно иметь достаточно большую длину провисающего упаковочного материала, так как в этом случае отсутствуют затраты энергии на разгон рулона.

На рис. 2 представлен мехатронный пружинный привод с рекуперацией энергии для размотки и протягивания упаковочного материала, в котором для компенсации диссипативных потерь установлен пневматический цилиндр.

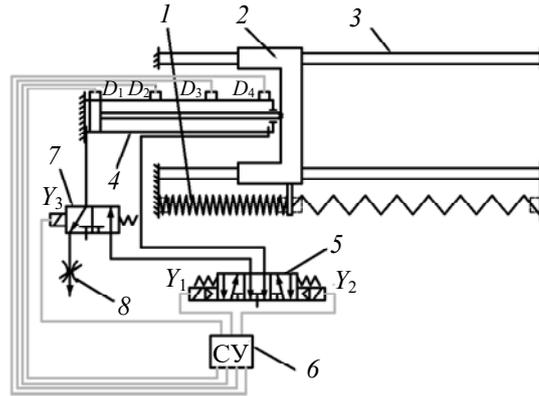


Рис. 2

Рассматриваемый пружинный привод состоит из двух пружин растяжения  $l$  с жесткостью  $c$ , установленных с двух сторон от каретки  $2$ , перемещающейся по направляющим  $3$ . Для компенсации диссипативных потерь используется пневматический цилиндр  $4$ , рабочие полости которого соединены с распределителем  $5$ , электромагнитные приводы  $Y_1$  и  $Y_2$  которого соединены с системой управления  $6$ . Кроме того, на корпусе пневматического цилиндра  $4$  установлены датчики положения  $D_1, D_2, D_3$  и  $D_4$ , выходы которых соединены с системой управления  $6$ . Привод также снабжен дополнительным распределителем  $7$ , предназначенным для предварительной зарядки пружинного привода.

Рассматриваемый пружинный привод, в котором не учитываются диссипативные потери, представляет собой консервативный линейный осциллятор с частотой колебаний, не зависящей от амплитуды  $x_{\max}$ .

Такая конфигурация привода позволяет программным способом организовать, в соответствии с теоремой Эри [9, 10], любой возможный вариант работы пневматического цилиндра для компенсации диссипативных потерь и обеспечения максимальной скорости каретки  $x_{\max}$  в среднем положении.

В работе [11] показано, что при одинаковых характеристиках рабочих операций затраты энергии привода уменьшаются в 9 раз по сравнению с электрическими, гидравлическими и пневматическими приводами и определяются как конфигурацией пружинного привода, так и трибологическими характеристиками материалов кинематических пар [12, 13]. Максимальная потенциальная энергия  $U_{\max}$  каждой пружины равна

$$U_{\max} = 2cx_{\max}^2 \quad (1)$$

Из уравнения механической энергии системы без учета диссипативных потерь

$$U_{\max} = U_T + T_T \quad (2)$$

( $U_T$  — текущая потенциальная энергия,  $T_T$  — текущая кинетическая энергия) после преобразований получим каноническое уравнение эллипса

$$\frac{x_T^2}{a^2} + \frac{\dot{x}_T^2}{b^2} = 1, \quad (3)$$

где  $a^2 = x_{\max}^2$  и  $b^2 = \frac{\pi^2}{t^2} x_{\max}^2$ .

На рис. 3 приведены графики скорости и ускорения каретки для случая, когда параметры системы в режиме рабочего и холостого хода одинаковы и отсутствует внешняя инерционная нагрузка ( $1$  — скорость каретки до достижения среднего положения,  $2$  — скорость ленты после достижения среднего положения каретки,  $3$  — ускорение каретки,  $4$  — закон движения каретки без включения цилиндра).

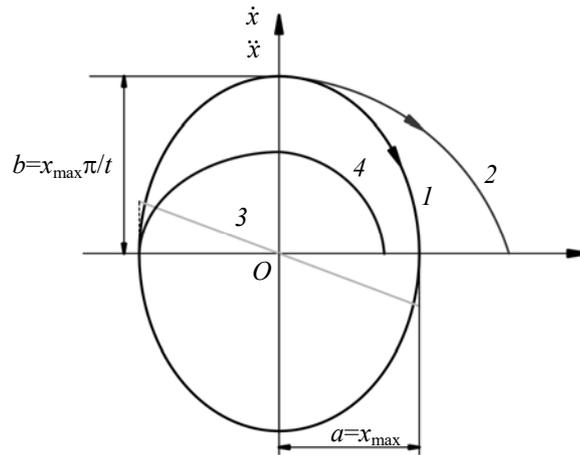


Рис. 3

Скорость каретки после прохождения среднего положения уменьшается, и если перед этим упаковочный материал был натянут и рулон с упаковочным материалом вращался, то рулон продолжит вращение в режиме свободного выбега, а у каретки под действием усилия пружин скорость уменьшается в соответствии с уравнением (2).

На рис. 4, а приведена циклограмма включения пневматического цилиндра в начале и конце перемещения для компенсации диссипативных потерь, что обеспечивает движение по верхней части кривой на рис. 3 ( $F_{ц}$  — усилие пневматического цилиндра,  $F_2$  — усилие пружины). На рис. 4, б показана циклограмма включения пневматического цилиндра в режиме холостого хода.

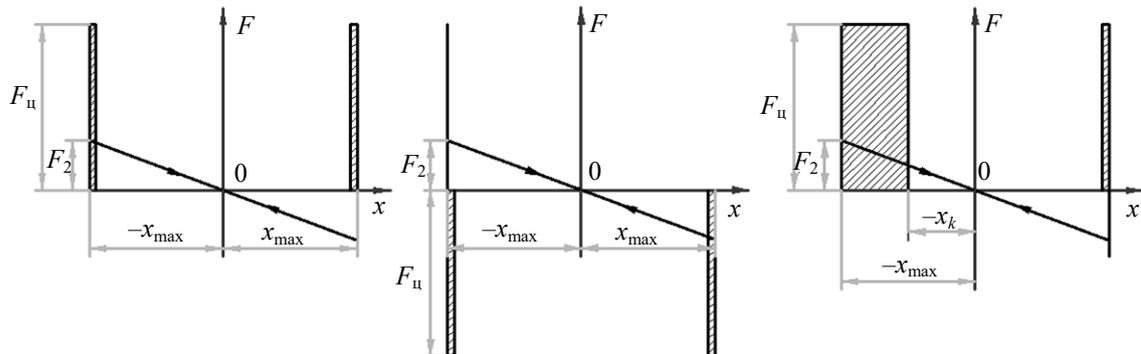


Рис. 4

В случае внешней инерционной нагрузки при рабочем ходе для достижения максимальной скорости упаковочного материала при прохождении кареткой среднего положения, обеспечивающей зарядку пружинного привода, продолжительность времени включения пневматического цилиндра увеличивается и зависит от текущего значения момента инерции рулона. На рис. 4, в показана циклограмма включения пневматического цилиндра, где координата  $x_k$  соответствует координате каретки, при которой происходит отключение пневматического цилиндра.

На рис. 3 видно, что каретка не достигнет крайнего положения, поскольку ее кинетическая энергия меньше требуемой. В связи с этим увеличивается время включения пневматического цилиндра.

Уравнение механической энергии для этого режима имеет вид

$$U_0 + F_{ц}(x_{\max} - x_k) = 0,5m \dot{x}_{\max}^2 + \nu U_{\max}, \quad (4)$$

где  $\nu$  — коэффициент потерь в пружинном приводе.

Из уравнения (4) найдем координату  $x_k$  выключения пневматического цилиндра

$$x_k = x_{\max} - \frac{vU_3}{F_{\text{ц}}}. \quad (5)$$

Усилие на штоке пневматического цилиндра  $F_{\text{ц}}$  должно быть равно максимальному усилию пружины или больше него, это обеспечивает фиксацию каретки в крайних положениях.

Определим длину сматываемого упаковочного материала после прохождения кареткой среднего положения при вращающемся рулоне, когда образуются две динамические системы: свободно вращающийся рулон со сматываемым упаковочным материалом и каретка, в которой кинетическая энергия элементов, совершающих прямолинейное движение, переходит в потенциальную энергию пружинного привода.

Кинетическая энергия вращающегося рулона  $T$  определяется из выражения

$$T = \frac{1}{4} m \dot{x}_{\max}^2. \quad (6)$$

На рис. 5 проиллюстрирована центровка рулона относительно центровочной оси.

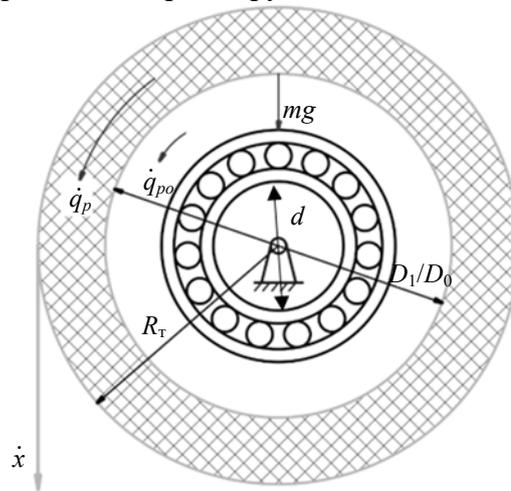


Рис. 5

Работа сил трения во время свободного выбега рулона до полной остановки, с учетом приведенного коэффициента трения  $f_{\text{пр}}$ , равна [14]:

$$A = 0,5mg f_{\text{пр}} dq. \quad (7)$$

Из совместного решения уравнений (6) и (7) получим выражение для определения угла поворота рулона  $q$  до его полной остановки

$$q = \frac{x_{\max}^2}{2gdf_{\text{пр}}}, \quad (8)$$

что позволяет определить длину сматываемого материала

$$L = qR = \frac{x_{\max}^2}{2gdf_{\text{пр}}} R. \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что длина сматываемого материала определяется конструктивными параметрами, максимальной скоростью каретки и текущим значением радиуса рулона. При максимальном (начальном) радиусе рулона имеем наибольшую свободную длину сматываемого упаковочного материала.

Рассмотрим рулон упаковочного материала как сплошной диск, тогда момент его инерции определяется из выражения

$$J = 0,5m_r R^2. \quad (10)$$

Расчетной характеристикой привода является приведенная масса. Нас интересует соотношение приведенной массы рулона к текущей.

Расчетная масса ( $m_p$ ) включает в себя приведенную к каретке пружинного привода массу рулона ( $m_{пр}$ ) и массу ( $m_{дч}$ ) всех движущихся поступательных элементов привода (например, каретки, штока и поршня пневматического цилиндра, захватного устройства):

$$m_p = m_{пр} + m_{дч}, \quad (11)$$

где  $m_{пр} = 0,5m$ .

Устройство для протягивания упаковочного материала является мехатронной системой приводов, состоящей из пружинного аккумулятора, пневматического цилиндра, электромагнитных приводов пневматических распределителей, информационно-измерительной системы и системы управления, связанной с системами управления верхнего уровня. Такой подход обеспечивает снижение затрат энергии благодаря рекуперации энергии и выбору режимов работы с учетом текущего значения массы рулона и автоматическим определением конфигурации упаковочного материала.

Результаты исследования использованы при разработке мехатронной пневматической системы приводов фасовочно-упаковочного автомата для сыпучих продуктов, также они могут быть полезны для разработчиков энергосберегающего технологического оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корендяев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И. Теоретические основы робототехники. М.: Наука, 2006. 376 с.
2. Левин А. И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
3. Пелупесси Д. С., Жавнер М. В. Пружинные аккумуляторы для шаговых приводов // Современное Машиностроение. Наука и образование. 2016. № 5. С. 499—509.
4. Zhavner V. L., Matsko O. N. Spring drives for reciprocal motion // J. of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. Vol. 45, N 1. P. 1—5.
5. Zhao Wen, Zhavner V. L. The use of pneumatic cylinders with a return spring to compensate for balance losses in mechanical regenerative drives for reciprocating movements // 6th Intern. BAPT Conf. "Power Transmissions 2019". Varna, 2019. Vol. 1. P. 107—112.
6. Musalimov V., Minh V., Tamre M., Altunin V. Development of a Wiveless Sensor Network Combining MATLAB and Embedded Microcontrollers // Sensor Letters. USA. 2015. Vol. 13. P. 1—6.
7. Сысоев С. Н., Глушков А. А. Цикловые приводы колебательного типа. Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010. 184 с.
8. Надеждин И. В. Высокодинамичные механизмы вспомогательных операций автоматизированных сборочных производств. М.: Машиностроение, 2008. 270 с.
9. Kellhoff G. La formule d'Airy // Mem. Acad. Bel. 1897. Vol. 5, N 11.
10. Баутин Н. Н. Динамическая теория часов. М.: Наука, 1986. 192 с.
11. Zhavner V. L., Matsko O. N., Zhavner M. V. Comparative Analysis of Mechatronic Drives for Reciprocal Motion // Intern. Review of Mechanical Engineering (I.RE.M.E.). 2018. Vol. 9, N 12. P. 784—789.
12. Musalimov V., Nuzhdin K., Kalapyshina I. Modelling of Nonlinear Dynamic of Mechanic Systems with the Force Tribological Interaction // Tribology in Industry. Serbija. 2015. Vol. 37, is. 3. P. 360—365.
13. Musalimov V., Kovalenko P., Perepelkina S. Estimation of Triboresistance of Erythrocytes during Surface Scanning with use of Atomic Force Microscopy // FME Transactions. Belgrad: University of Belgrade, 2015. Vol. 43, N 3. P. 254—258.
14. Колчин Н. И. Механика машин. Т. 1. М.: Машиностроение, 1972. 456 с.

#### Сведения об авторах

**Виктор Леонидович Жавнер** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа автоматизации и робототехники, E-mail: vjavner@outlook.com

- Чжао Вэнь** — аспирант; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа автоматизации и робототехники;  
E-mail: wenfly2015@yandex.ru
- У Лун** — магистр; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа автоматизации и робототехники;  
E-mail: wulong094@gmail.com

Поступила в редакцию  
03.02.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Жавнер В. Л., Чжао Вэнь, У Лун. Исследование мехатронного устройства для размотки и протягивания рулонных материалов в дискретном режиме // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 4. С. 322—329.

### STUDY OF A MECHATRONIC DEVICE FOR UNWINDING AND BROACHING ROLLED MATERIALS IN DISCRETE MODE

V. L. Zhavner, Wen Zhao, Long Wu

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
195251, St. Petersburg, Russia  
E-mail: wenfly2015@yandex.ru*

A mechatronic device for unwinding and broaching rolled materials in discrete mode is studied. To reduce energy consumption, a spring drive with energy recovery is used, in which a pneumatic cylinder is installed to compensate for dissipative losses. Traditionally, such spring drives are used for reciprocating movements of working bodies with a constant mass. A special feature of the operation for unwinding roll materials in discrete mode is the change in the mass of the roll brought to the spring drive. The laws of mass change are established, and an algorithm is proposed that allows programmatic variation of the shutdown time of the pneumatic cylinder to ensure the maximum required speed of the carriage in the middle position. In this case, there is a free run-out of the roll and the packaging material is unwound, so that the tape hangs along the route. Further work cycles are performed in idle mode with minimal energy consumption. The change in mass is controlled by accounting for the number of cycles, and the mass reduction by a specific amount is set by the program. The results of the work are used when developing a mechatronic pneumatic system for the drives of a filling and packaging machine. It is supposed that the results can be used by developers of energy-saving technological equipment.

**Keywords:** mechatronic device, roll, energy recovery, variable inertial load, spring battery, pneumatic cylinder, dissipative losses

#### REFERENCES

1. Korendyasev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I. *Teoreticheskiye osnovy robototekhniki* (Theoretical Foundations of Robotics), Moscow, 2006, 376 p. (in Russ.)
2. Levin A.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v issledovaniyakh i proyektirovani stankov* (Mathematical Modeling in Research and Design of Machine Tools), Moscow, 1978, 184 p. (in Russ.)
3. Pelupessi D.S., Zhavner M.V. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i Obrazovaniye*, 2016, no. 5, pp. 499–509. (in Russ.)
4. Zhavner V.L., Matsko O.N. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, no. 1(45), pp. 1–5.
5. Zhao Wen, Zhavner V.L. *6th International BAPT Conference "Power Transmissions 2019"*, Varna, 2019, vol. 1, pp. 107–112.
6. Musalimov V., Minh V., Tamre M., Altunin V. *Sensor Letters*, 2015, vol. 13, pp. 1–6.
7. Sysoyev S.N., Glushkov A.A. *Tsiklovyye privody kolebatelnogo tipa* (Oscillating Cycle Drives), Vladimir, 2010, 184 p. (in Russ.)
8. Nadezhdin I.V. *Vysokodinamichnyye mekhanizmy vspomogatel'nykh operatsiy avtomatizirovannykh sborochnykh proizvodstv* (Highly Dynamic Mechanisms for Auxiliary Operations of Automated Assembly Plants), Moscow, 2008, 270 p. (in Russ.)
9. Kellhoff G. *Mem. Acad. Bel.*, 1897, no. 11(5).
10. Bautin N.N. *Dinamicheskaya teoriya chasov* (Dynamic Clock Theory), Moscow, 1986, 192 p. (in Russ.)
11. Zhavner V.L., Matsko O.N., Zhavner M.V. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, 2018, no. 9(12), pp. 784–789.
12. Musalimov V., Nuzhdin K., Kalapyshina I. *Tribology in Industry*, Serbija, 2015, no. 3(37), pp. 360–365.
13. Musalimov V., Kovalenko P., Perepelkina S. *FME Transactions*, Belgrad, University of Belgrade, 2015, no. 3(43), pp. 254–258.

14. Kolchin N.I. *Mekhanika mashin* (Machine Mechanics), Moscow, 1972, 456 p. (in Russ.)

**Data on authors**

- Victor L. Zhavner** — Dr. Sci.; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Automation and Robotics; E-mail: vjavner@outlook.com
- Zhao Wen** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Automation and Robotics; E-mail: wenfly2015@yandex.ru
- Wu Long** — Master; St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Automation and Robotics; E-mail: wulong094@gmail.com

**For citation:** Zhavner V. L., Zhao Wen, Wu Long. Study of a mechatronic device for unwinding and broaching rolled materials in discrete mode. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 4. P. 322—329 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-4-322-329