

УДК 531.351

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-16-22

## Самостабилизация частоты вращения

И. П. Попов, кандидат технических наук, Курганский государственный университет, Курган, Россия

Целью работы является нахождение механического аналога циклотронного движения и определение схемы соответствующего устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором. Из ключевого обстоятельства, определяющего возможность обобщения циклотронного движения на механику, заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии, что применительно к стабилизированному ротатору можно трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запасать оба этих вида энергии, – и груз, и пружина. Собственная частота вращения стабилизированного ротатора строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой колебаний маятника с идентичными параметрами. При изменении момента импульса изменяется радиус и тангенциальная скорость, частота вращения при этом не меняется и равна собственной. Положению груза, при котором его центр масс совпадает с осью вращения, соответствует состояние неопределенного равновесия. При вращении груз равновероятно может отклониться в любую из двух сторон и, соответственно, будет развиваться либо сжатие, либо растяжение пружины. Состояние неопределенного равновесия можно исключить, обеспечив начальное (статическое) смещение груза и равную ему начальную деформацию пружины. Подобно тому, как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой, частота вращения стабилизированного ротатора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения. При нулевом вращающем моменте в стационарном режиме частота вращения стабилизированного ротатора не может быть произвольной и принимает единственное значение. Стабилизированный ротатор может использоваться для управления собственной частотой колебаний радиального осциллятора, хотя в этом качестве он может иметь сильную конкуренцию со стороны мехатронных систем. Напротив, в качестве стабилизатора вращений его конкурентные возможности неоспоримы и определяются предельной простотой конструкции.

**Ключевые слова:** ротатор, маятник, частота вращения, стабилизация, выбег, энергия, момент импульса, циклотронное движение.

### Введение

Механические и электромагнитные явления и процессы во многих случаях математически изоморфны. В соответствии с этим в работе [1] выполнен анализ колебаний в механических системах на основе аналогий с электрическими цепями; в [2] исследуются динамические процессы стартер-генератора методом электромеханической аналогии; в [3] осуществляется математическое моделирование динамического поведения электромеханических систем с помощью уравнений Лагранжа второго рода; в [4] приводится решение задачи о собственных колебаниях электроупругих тел с внешними электрическими цепями на основе их электрического аналога.

Это дает возможность обобщить достижения одной научной специальности для других. В этом смысле представляет интерес циклотронное движение электрического заряда, которое характеризуется *фиксированной частотой вращения*. Это следует из баланса сил:

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow v = \frac{qB}{m}r = \omega r \Rightarrow \omega = \frac{qB}{m}.$$

Здесь  $q$  – величина электрического заряда;  $v$  – тангенциальная скорость заряда;  $B$  – магнитная индукция;  $m$  – масса заряженной частицы;  $r$  – радиус циклотронного движения;  $\omega$  – частота вращения.

Как видим, частота действительно не зависит ни от скорости, ни от радиуса.

Представленные формулы также не зависят от выбора зарядов. Например, в [5] рассматривается циклотронное движение электронов, в [6] – циклотронное движение ионов, в [7] – циклотронное движение плотного электронного сгустка, в [8] – циклотронное движение плазмы.

Ключевым обстоятельством для возможности обобщения циклотронного движения на механику является то, что лагранжиан электрона, движущегося поперек постоянного магнитного поля, вдвое больше его кинетической энергии:

$$L = \frac{mv^2}{2} + e(\mathbf{v}, \mathbf{A}).$$

Векторный потенциал магнитного поля

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2}[\mathbf{B}, \mathbf{r}],$$

при этом  $\mathbf{v} = [\boldsymbol{\omega}, \mathbf{r}]$ .

Таким образом,

$$L = \frac{mv^2}{2} + \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}.$$

Второе слагаемое

$$\frac{q^2 B^2 r^2}{2m} = \frac{q^2 B^2}{2m} \frac{m^2 v^2}{q^2 B^2} = \frac{mv^2}{2}.$$

$$L = 2 \frac{mv^2}{2}.$$

**Целью работы** является нахождение механического аналога циклотронного движения и определение схемы соответствующего устройства, которое уместно назвать стабилизированным ротатором.

Тема стабилизации вращений достаточно актуальна, в том числе для двухосной системы стабилизации [9]; для стабилизации сигнала, временной коррекции и быстрого вращения образца [10]; в системе самокалибрующей сферической стабилизации видео на основе гироскопа [11]; в интерферометре Маха – Цендера для обнаружения и неинвазивного оптического усиления вращения поляризации [12].

Для нормальной работы многих технических систем требуется стабилизированная частота вращения. К таким системам относятся генераторные установки переменного тока, насосные станции, конвейерные линии, обрабатывающие станки, ветрогенераторы и др.

Существующие ротаторы могут свободно вращаться с любой скоростью, поэтому для их стабилизации используются специальные устройства, как правило, следящего типа, что приводит к усложнению и удорожанию конструкций.

В этой связи представляет интерес возможность создания ротатора с фиксированной частотой свободного вращения подобно вращению электрона при циклотронном движении.

### Методы исследования

Из ключевого обстоятельства, определяющего возможность обобщения циклотронного движения на механику, заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его ки-

нетической энергии, что применительно к стабилизированному ротатору следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запасать оба этих вида энергии – груз (массой  $m$ ) и пружина (с коэффициентом упругости  $k$ ).

### Синтез стабилизированного ротатора

В соответствии с характером циклотронного движения и, соответственно, ротатора, имеет место радиус вращения ( $r$ ) и циклическая частота ( $\omega$ ).

Из равенства энергий следует

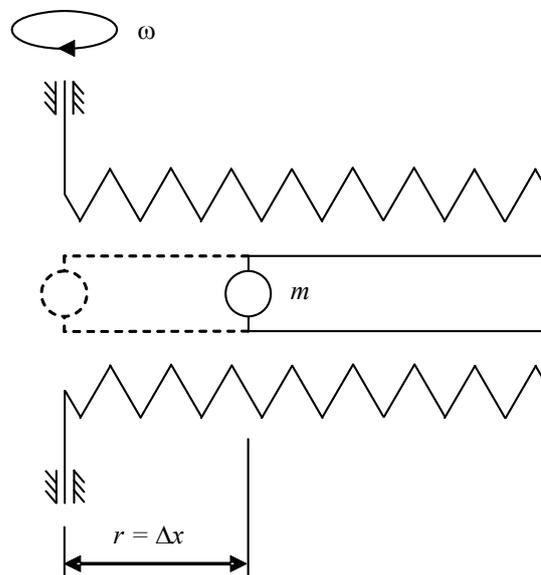
$$\frac{k(\Delta x)^2}{2} = \frac{mv^2}{2} = \frac{mr^2\omega^2}{2} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \frac{\Delta x}{r}.$$

Здесь  $\Delta x$  – величина абсолютной деформации пружины.

Неизменность циклической частоты обеспечивается очевидным ключевым условием

$$\Delta x = r.$$

Установленные необходимые обстоятельства определяют принципиальную схему стабилизированного ротатора, которая представлена на рисунке.



Стабилизированный ротатор

Stabilized rotator

Собственная частота вращения стабилизированного ротатора

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{1}$$

строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой *колебаний* маятника с идентичными параметрами.

### Кинематика стабилизированного ротатора

Момент импульса стабилизированного ротатора

$$L = J\omega_0 = mr^2\omega_0 = mr^2\sqrt{\frac{k}{m}} = r^2\sqrt{mk}.$$

Здесь  $J$  – момент инерции;  $x_\omega = \sqrt{mk}$  – волновой реактанс;

$$r = \frac{v}{\omega_0};$$

$$L = r^2x_\omega = \frac{v^2}{\omega_0^2}x_\omega = v^2\frac{m}{k}\sqrt{mk} = \frac{m}{\omega_0}v^2.$$

При изменении момента импульса изменяется радиус и тангенциальная скорость, частота вращения при этом не меняется и равна собственной.

Положению груза, при котором его центр масс совпадает с осью вращения, соответствует состояние неопределенного равновесия. При вращении груз равновероятно может отклониться в любую из двух сторон и, соответственно, будет развиваться либо сжатие, либо растяжение пружины.

Состояние неопределенного равновесия можно исключить, обеспечив начальное (статическое) смещение груза  $r_0$  и равную ему начальную деформацию пружины.

### Динамика стабилизированного ротатора

При раскручивании преднапряженного ротатора до частоты  $\omega_0$  центробежная сила  $m\omega^2r$  меньше силы начальной деформации пружины  $kr_0$ , поэтому радиус  $r_0$  не изменяется. Это участок линейной динамики  $[0, \omega_0]$ :

$$r = r_0, \quad \omega = \frac{M}{mr_0^2}t.$$

За время  $t_0$  при постоянном вращающем моменте  $M$  ротатор достигнет частоты вращения  $\omega_0$ :

$$t_0 = \frac{\omega_0 mr_0^2}{M} = \frac{\sqrt{mk}r_0^2}{M} = \frac{L_0}{M}.$$

При дальнейшем нагружении стабилизированного ротатора вращающим моментом его динамика (нелинейный участок) описывается системой двух дифференциальных уравнений –

вращательного и поступательного (радиально-го); трение не учитывается:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J} = \frac{M}{mr^2}, \\ m\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{mv^2}{r} - kr = \frac{m\omega^2r^2}{r} - kr = (m\omega^2 - k)r. \end{cases}$$

Начальные условия:

$$\omega|_{t=t_0} = \omega_0, \quad r|_{t=t_0} = r_0, \quad \frac{dr}{dt}|_{t=t_0} = 0.$$

Из системы уравнений и начальных условий следует

$$\frac{d\omega}{dt}|_{t=t_0} = \frac{M}{mr_0^2};$$

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} = 2\frac{M}{mr^3}\frac{dr}{dt}, \quad \frac{d^2\omega}{dt^2}|_{t=t_0} = 0;$$

$$\frac{d^2r}{dt^2} = (\omega^2 - \omega_0^2)r, \quad \frac{d^2r}{dt^2}|_{t=t_0} = 0;$$

$$\frac{d^3r}{dt^3} = 2\omega\frac{d\omega}{dt}r + (\omega^2 - \omega_0^2)\frac{dr}{dt},$$

$$\frac{d^3r}{dt^3}|_{t=t_0} = 2\omega_0\frac{M}{mr_0^2}r_0 = 2\omega_0\frac{M}{mr_0};$$

$$\frac{d^3\omega}{dt^3} = 6\frac{M}{mr^4}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 - 2\frac{M}{mr^3}\frac{d^2r}{dt^2}, \quad \frac{d^3\omega}{dt^3}|_{t=t_0} = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4\omega}{dt^4} &= -24\frac{M}{mr^5}\left(\frac{dr}{dt}\right)^3 + 6\frac{M}{mr^4}2\frac{dr}{dt}\frac{d^2r}{dt^2} + \\ &+ 6\frac{M}{mr^4}\frac{dr}{dt}\frac{d^2r}{dt^2} - 2\frac{M}{mr^3}\frac{d^3r}{dt^3}; \end{aligned}$$

$$\frac{d^4\omega}{dt^4}|_{t=t_0} = -2\frac{M}{mr_0^3}2\omega_0\frac{M}{mr_0} = -4\omega_0\frac{M^2}{m^2r_0^4};$$

$$\begin{aligned} \frac{d^4r}{dt^4} &= 2\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2r + 2\omega\frac{d^2\omega}{dt^2}r + 2\omega\frac{d\omega}{dt}\frac{dr}{dt} + \\ &+ 2\omega\frac{d\omega}{dt}\frac{dr}{dt} + (\omega^2 - \omega_0^2)\frac{d^2r}{dt^2}; \end{aligned}$$

$$\frac{d^4r}{dt^4}|_{t=t_0} = 2\left(\frac{M}{mr_0^2}\right)^2r_0 = \frac{2M^2}{m^2r_0^3}.$$

Таким образом, частота вращения стабилизированного ротатора и радиус представимы в следующем виде:

$$\begin{aligned} \omega &\approx \frac{1}{0!} \omega(0)t^0 + \frac{1}{1!} \frac{d\omega}{dt}(0)t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2\omega}{dt^2}(0)t^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3\omega}{dt^3}(0)t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4\omega}{dt^4}(0)t^4 + \dots = \\ &= \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2}t + \frac{1}{2!}0t^2 + \frac{1}{3!}0t^3 - \frac{1}{4!}4\omega_0 \frac{M^2}{m^2r_0^4}t^4 + \dots = \\ &= \omega_0 + \frac{M}{mr_0^2}t - \frac{\omega_0 M^2}{6m^2r_0^4}t^4 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r &\approx \frac{1}{0!} r(0)t^0 + \frac{1}{1!} \frac{dr}{dt}(0)t^1 + \frac{1}{2!} \frac{d^2r}{dt^2}(0)t^2 + \\ &+ \frac{1}{3!} \frac{d^3r}{dt^3}(0)t^3 + \frac{1}{4!} \frac{d^4r}{dt^4}(0)t^4 + \dots = \\ &= r_0 + 0t + \frac{1}{2!}0t^2 + \frac{1}{3!}2\omega_0 \frac{M}{mr_0}t^3 + \frac{1}{4!} \frac{2M^2}{m^2r_0^3}t^4 + \dots = \\ &= r_0 + \frac{\omega_0 M}{3mr_0}t^3 + \frac{M^2}{12m^2r_0^3}t^4 + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Вопрос о сходимости рядов здесь не рассматривается.

Смысл последних двух уравнений состоит в иллюстрации нелинейности динамики стабилизированного ротатора при нагружении его постоянным вращающим (тормозящим) моментом. Нелинейный характер движения некоторым образом подобен другим нелинейным процессам, например, при моделировании и настройке систем с нелинейной динамикой [13]; нелинейной динамике тонкой узкой ленты в воздушном потоке [14]; движению маятника на вращающемся и вибрирующем основании [15]; колебаниям двойного математического маятника с внутренним трением [16].

Подобно тому, как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой, частота вращения стабилизированного ротатора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения.

Из (2) следует, что чем меньше момент  $M$  и больше  $m$  и  $r_0$ , тем меньше отклонение частоты вращения  $\omega$  от собственной  $\omega_0$ .

### Второе замечательное свойство стабилизированного ротатора

(Первым является фиксированная собственная частота вращения (1) и ее совпадение с собственной частотой колебаний маятника.)

При *вынужденном* вращении стабилизированного ротатора с постоянной частотой  $\omega = a\omega_0$  ( $a$  – безразмерный коэффициент) его радиальная динамика определяется уравнением

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \left( \omega^2 - \frac{k}{m} \right) r = (a^2\omega_0^2 - \omega_0^2)r = -(1-a^2)\omega_0^2 r.$$

В зависимости от значения  $a$  возможны три варианта.

1. При  $a < 1$  имеет место дифференциальное уравнение свободных гармонических незатухающих колебаний с собственной частотой

$$\omega_a = \omega_0 \sqrt{1-a^2}.$$

Таким образом, стабилизированный ротатор доставляет возможность управлять собственной частотой колебаний радиального осциллятора.

2. При  $a = 1$   $\frac{d^2r}{dt^2} = 0$ ,  $\frac{dr}{dt} = V = \text{const}$ ,

$$r = r_{01} + Vt.$$

Колебания не происходят.

3. При  $a > 1$   $\frac{d^2r}{dt^2} = (a^2 - 1)\omega_0^2 r$ ,  $r = r_{01} e^{(\omega_0 \sqrt{a^2-1})t}$ .

Колебания не происходят.

Затухание колебаний в стабилизированном ротаторе принципиально не отличается от затухания в обычных колебательных системах, например, от затухающих колебаний крупногабаритных космических конструкций [17]; свободных затухающих колебаний диафрагменных пневматических рессор [18]; затухающих колебаний пластины с учетом амплитудно-зависимого рассеяния энергии в материале [19]; затухающих колебаний манометрических пружин с жестким наконечником [20].

### Выбег ротатора в стабилизированном режиме

Минимальная полная энергия стабилизированного ротатора в стабилизированном режиме соответствует статическому смещению груза  $r_0$ :

$$W_0 = K_0 + U_0 = 2K_0 = 2U_0 = kr_0^2.$$

Максимальная полная энергия теоретически не ограничена, а практически определяется конструктивно установленным максимальным радиусом  $r_m$ :

$$W_m = kr_m^2.$$

Пусть средняя за выбег мощность диссипативных потерь равна  $P$ . Тогда время выбега составит

$$\tau = \frac{W_m - W_0}{P} = k \frac{r_m^2 - r_0^2}{P}.$$

Очевидно, что чем меньше  $P$ , тем меньше отклонение частоты вращения  $\omega$  от собственной  $\omega_0$ .

### Обсуждение результатов

Особенностями стабилизированного ротатора являются: идентичность формулы частоты вращения формуле частоты пружинного маятника, равенство кинетической и потенциальной энергий и вытекающее из этого равенство радиуса вращения груза величине деформации пружины.

Стабилизированный ротатор может использоваться для управления собственной частотой колебаний радиального осциллятора, хотя в этом качестве он может иметь сильную конкуренцию со стороны мехатронных систем.

Напротив, в качестве стабилизатора вращений его конкурентные возможности неоспоримы и определяются предельной простотой конструкции.

### Выводы

Механический аналог циклотронного движения определен – им является стабилизированный ротатор, обладающий фиксированной частотой вращения, не зависящей от момента импульса и момента инерции. Это означает, что при нулевом вращающем моменте в стационарном режиме частота вращения стабилизированного ротатора не может быть произвольной и принимает единственное значение.

### Библиографические ссылки

1. Горский А. Н., Чернышева Ю. В. Анализ колебаний в механических системах на основе аналогий с электрическими цепями // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2017. № 5. С. 26–30.
2. Абдуллаев Я. Р., Ханахмедова С. А. Исследование динамических процессов стартер-генератора методом электромеханической аналогии // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2018. Т. 61, № 1. С. 32–39.
3. Нечаев Л. М., Семенова Л. П. Математическое моделирование динамического поведения электромеханических систем с помощью уравнений Лагранжа второго рода // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 9. С. 425–431.
4. Решение задачи о собственных колебаниях электроупругих тел с внешними электрическими цепями на основе их электрического аналога / М. А. Юрлов, Д. А. Ошмарин, Н. В. Севодина, Н. А. Юрлова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2018. № 4. С. 266–277.
5. Минашин П. В., Кукушкин А. Б. Спектральная интенсивность электронного циклотронного излучения, выходящего из плазмы токамака-реактора на первую стенку // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. 2019. Т. 42, № 4. С. 14–20.
6. Спектр ионно-циклотронного излучения из плазмы токамака Туман-3М при инжекционном нагреве / Л. Г. Аскинази, Г. И. Абдуллина, А. А. Белокуров, М. Д. Блехштейн, Н. А. Жубр, В. А. Корнев, С. В. Крикунов, С. В. Лебедев, Д. В. Разуменко, А. И. Смирнов, А. С. Тукачинский // *Письма в журнал технической физики*. 2018. Т. 44, № 22. С. 48–56.
7. Опарина Ю. С., Савилов А. В. Спонтанное циклотронное излучение плотного электронного сгустка // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2018. Т. 82, № 12. С. 1771–1774.
8. Анализ оптического циклотронного излучения поляра CRTS CSS081231 J071126+440405 / А. И. Колбин, Н. А. Серебрякова, М. М. Габдеев, Н. В. Борисов // *Астрофизический бюллетень*. 2019. Т. 74, № 1. С. 87–100.
9. Kim D.N., Kim K.H., Jung T.Ye., Kim D.G. A simple estimation of the rotation parameter for the 2-axes stabilization system. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2005, vol. E88-A, no. 6, p. 1507.
10. Jager M.F., Ott C., Kaplan C.J., Kraus P.M., Neumark D.M., Leone S.R. Attosecond transient absorption instrumentation for thin film materials: phase transitions, heat dissipation, signal stabilization, timing correction, and rapid sample rotation. *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, no. 1, p. 013109.
11. Ren Z., Chen C., Fang M. Self-calibration spherical video stabilization based on gyroscope. *Information (Switzerland)*, 2021, vol. 12, no. 8.
12. LaForge J.M., Steeves G.M. A mach-zehnder interferometer for the detection and noninvasive optical amplification of polarization rotation. *Review of Scientific Instruments*, 2008, vol. 79, no. 6, p. 063106.
13. Моделирование и настройка систем с нелинейной динамикой / Д. А. Гринюк, Н. М. Олиферович, И. Г. Сухорукова, И. О. Оробей // *Труды БГТУ. Серия 3: Физико-математические науки и информатика*. 2021. № 2 (248). С. 65–71. DOI: 10.52065/2520-6141-2021-248-2-65-71.
14. Афанасьева А. А., Гуськов А. М., Пановко Г. Я. Нелинейная динамика тонкой узкой ленты в воздушном потоке // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2019. № 7. С. 64–71.
15. Маркеев А. П. О маятнике на вращающемся и вибрирующем основании // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 477, № 5. С. 542–546.
16. Смирнов А. С., Смольников Б. А. Колебания двойного математического маятника с внутренним трением // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2022. № 11. С. 113–125.
17. Стец А. А. Аппроксимация затухающих колебаний крупногабаритных космических конструкций // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки*. 2021. № 3 (96). С. 64–76.
18. Новиков В. В., Поздеев А. В., Чумаков Д. А. Экспериментальное исследование влияния дополнительного объема и демпфирующего устройства на свободные затухающие колебания диафрагменных пневматических рессор // *Вестник Иркутского госу-*

дарственного технического университета. 2018. Т. 22, № 10 (141). С. 212–226.

19. Шишкин В. М., Левашов А. П. Моделирование затухающих колебаний пластины с учетом амплитудно-зависимого рассеяния энергии в материале // *Advanced Science*. 2017. № 3 (7). С. 367–376.

20. Исследование затухающих колебаний манометрических пружин с жестким неконечником / Д. А. Черенцов, С. П. Пирогов, С. М. Дорофеев, С. А. Черенцова // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2017. № 1. С. 116–120.

### References

1. Gorsky A.N., Chernysheva Yu.V. [Analysis of vibrations in mechanical systems based on analogies with electrical circuits]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta*, 2017, no. 5, pp. 26-30 (in Russ.).

2. Abdullaev Ya.R., Khanakhmedova S.A. [Investigation of the dynamic processes of the starter-generator by the method of electromechanical analogy]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2018, vol. 61, no. 1, pp. 32-39 (in Russ.).

3. Nechaev L.M., Semenova L.P. [Mathematical modeling of the dynamic behavior of electromechanical systems using the Lagrange equations of the second kind]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, 2021, no. 9, pp. 425-431 (in Russ.).

4. Yurlov M.A., Oshmarin D.A., Sevodina N.V., Yurlova N.A. [Solving the problem of natural oscillations of electroelastic bodies with external electrical circuits based on their electrical analogue]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2018, no. 4, pp. 266-277 (in Russ.).

5. Minashin P.V., Kukushkin A.B. [Spectral intensity of electron cyclotron radiation emerging from the plasma of the tokamak reactor on the first wall]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyy sintez*, 2019, vol. 42, no. 4, pp. 14-20 (in Russ.).

6. Askinazi L.G., Abdullina G.I., Belokurov A.A., Blekhshtein M.D., Zhubr N.A., Kornev V.A., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Razumenko D. V., Smirnov A.I., Tukachinsky A.S. [Spectrum of ion-cyclotron radiation from the plasma of the Tuman-3M tokamak during injection heating]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2018, vol. 44, no. 22, pp. 48-56 (in Russ.).

7. Oparina Yu.S., Savilov A.V. [Spontaneous cyclotron radiation of a dense electron bunch]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya*, 2018, vol. 82, no. 12, pp. 1771-1774 (in Russ.).

8. Kolbin A.I., Serebryakova N.A., Gabdeev M.M., Borisov N.V. [Analysis of the optical cyclotron radiation of the polar CRTS CSS081231 J071126+440405]. *Astrofizicheskiy byulleten'*, 2019, vol. 74, no. 1, pp. 87-100.

9. Kim D.N., Kim Ki.H., Jung T.Ye., Kim D.G. A simple estimation of the rotation parameter for the 2-axes stabilization system. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2005, vol. E88-A, no. 6, p. 1507.

10. Jager M.F., Ott C., Kaplan C.J., Kraus P.M., Neumark D.M., Leone S.R. Attosecond transient absorption instrumentation for thin film materials: phase transitions, heat dissipation, signal stabilization, timing correction, and rapid sample rotation. *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, no. 1, p. 013109.

11. Ren Z., Chen C., Fang M. Self-calibration spherical video stabilization based on gyroscope // *Information (Switzerland)*, 2021, vol. 12, no. 8.

12. LaForge J.M., Steeves G.M. A mach-zehnder interferometer for the detection and noninvasive optical amplification of polarization rotation. *Review of Scientific Instruments*, 2008, vol. 79, no. 6, p. 063106.

13. Grinyuk D.A., Olinerovich N.M., Sukhorukova I.G., Orobei I.O. [Modeling and tuning systems with nonlinear dynamics]. *Trudy BGTU. Seriya 3: Fiziko-matematicheskiye nauki i informatika*, 2021, no. 2 (248), pp. 65-71 (in Russ.).

14. Afanas'eva A.A., Guskov A.M., Panovko G.Ya. [Nonlinear dynamics of a thin narrow strip in an air flow]. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2019, no. 7, pp. 64-71 (in Russ.).

15. Markeev A.P. [On a pendulum on a rotating and vibrating base]. *Doklady Akademii nauk*, 2017, vol. 477, no. 5, pp. 542-546 (in Russ.).

16. Smirnov A.S., Smolnikov B.A. [Oscillations of a double mathematical pendulum with internal friction]. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye*, 2022, no. 11, pp. 113-125 (in Russ.).

17. Stets A.A. [Approximation of damped oscillations of large space structures]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya Yestestvennyye nauki*, 2021, no. 3 (96), pp. 64-76 (in Russ.).

18. Novikov V.V., Pozdeev A.V., Chumakov D.A. [Experimental study of the effect of additional volume and damping device on free damped oscillations of diaphragm air springs]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, vol. 22, no. 10 (141), pp. 212-226 (in Russ.).

19. Shishkin V.M., Levashov A.P. [Modeling of damped oscillations of a plate taking into account the amplitude-dependent energy dissipation in the material]. *Advanced Science*, 2017, no. 3 (7), pp. 367-376 (in Russ.).

20. Cherentsov D.A., Pirogov S.P., Dorofeev S.M., Cherentsova S.A. [Investigation of damped oscillations of manometric springs with a rigid tip]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft i gaz*, 2017, no. 1, pp. 116-120 (in Russ.).

## Speed Self-Stabilization

*I.P. Popov*, PhD in Engineering, Kurgan State University, Kurgan, Russia

*The aim of the work is to find a mechanical analogue of cyclotron motion and to determine the scheme of the corresponding device, which is appropriate to call a stabilized rotator. From the key circumstance that determines the possibility of generalizing cyclotron motion to mechanics, which consists in the fact that the Lagrangian of an electron is twice as large as its kinetic energy, which, as applied to a stabilized rotator, should be interpreted as the equality of kinetic and potential energies, it follows that the composition of a stabilized rotator should include elements, which are able to store both of these types of energy, namely, the load and the spring. The natural frequency of rotation of a stabilized rotator is strictly fixed (it does not depend on either the moment of inertia or the moment of momentum) and remarkably coincides with the natural frequency of oscillations of a pendulum with identical parameters. When the angular momentum changes, the radius and tangential velocity change (the rotation frequency does not change and is equal to its own). The position of the load, in which its center of mass coincides with the axis of rotation, corresponds to a state of indefinite equilibrium. During rotation, the load can deviate with equal probability in any of the two directions and, accordingly, both compression and extension of the spring can develop. The state of indefinite equilibrium can be eliminated by providing the initial (static) displacement of the load and the initial deformation of the spring equal to it. Just as the frequency does not coincide with the natural frequency during forced oscillations of the pendulum, the rotation frequency of a stabilized rotator under loading does not coincide with the natural rotation frequency. At zero torque in the stationary mode, the rotational speed of the stabilized rotator cannot be arbitrary and takes on a single value. A stabilized rotator can be used to control the natural frequency of a radial oscillator, although in this capacity it may have strong competition from mechatronic systems. On the contrary, as a rotation stabilizer, its competitive capabilities are undeniable and are determined by the extreme simplicity of the design.*

**Keywords:** rotator, pendulum, frequency, stabilization, run-out, energy, angular momentum, cyclotron motion.

Получено 01.08.2022

### Образец цитирования

*Попов И. П.* Самостабилизация частоты вращения // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 3. С. 16–22. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-16-22.

### For Citation

*Popov I.P.* Samostabilizacija chastoty vrashhenija [Speed Self-Stabilization]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 16-22 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-16-22.