

И. П. Попов, старший преподаватель, ip.porow@yandex.ru,
Курганский государственный университет, г. Курган

Стабилизированный ротатор для мехатронных автоматических систем

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 следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, необходимо следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запасать оба этих вида энергии, а именно, 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 равномерно может отклониться в любую из двух сторон и, соответственно, может развиваться как сжатие, так и 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, стабилизация, выбег, энергия, момент импульса, циклотронное движение

Введение

Механические и электромагнитные явления и процессы во многих случаях математически изоморфны [1–3]. Это дает возможность обобщать достижения одной научной специальности на другую. 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 — электрический заряд, v — тангенциальная скорость заряда, B — магнитная индукция, m — масса заряженной частицы, r — радиус циклотронного движения, ω — частота вращения.

Частота действительно не зависит ни от скорости, ни от радиуса.

Ключевым обстоятельством для возможности обобщения циклотронного движения на механику является тот факт, 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 равен

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

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 равно

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

Тогда

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

Целью работы является нахождение механического аналога циклотронного движения

и определение схемы соответствующего устройства, которое уместно назвать *стабилизированным ротатором*.

Тема стабилизации вращений актуальна в автоматизированных системах [4–8].

Синтез стабилизированного ротатора

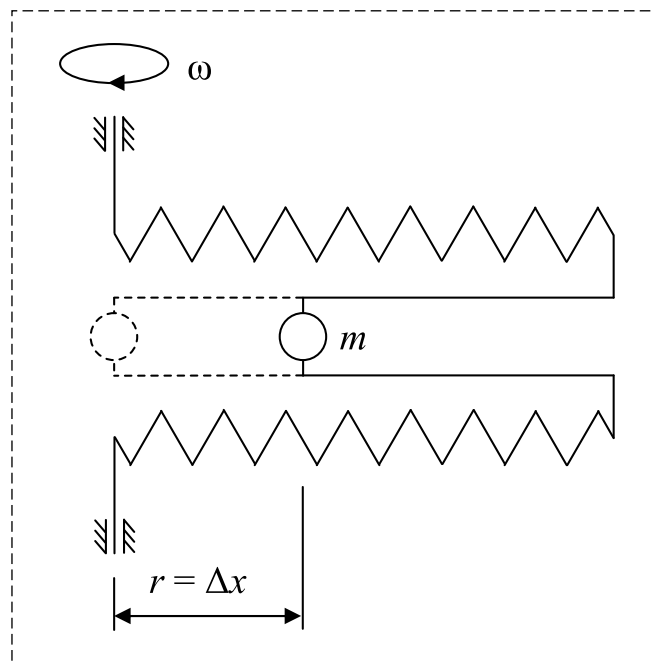
Из ключевого обстоятельства, определяющего возможность обобщения циклотронного движения на механику и заключающегося в том, что лагранжиан электрона вдвое больше его кинетической энергии, что применительно к стабилизированному ротатору следует трактовать как равенство кинетической и потенциальной энергий, необходимо следует, что в состав стабилизированного ротатора должны входить элементы, которые в состоянии запасать оба этих вида энергии, а именно, *груз* (массой m) и *пружина* (с коэффициентом упругости k).

В соответствии с характером циклотронного движения и, соответственно, ротатора необходимо имеет место *радиус* вращения (r) и *циклическая частота* (ω).

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 Δx — абсолютная деформация пружины.



Стабилизированный ротатор
Stabilized rotator

Неизменность циклической частоты обеспечивается очевидным ключевым условием

$$\Delta x = r.$$

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

Собственная частота вращения стабилизированного ротатора

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

строго фиксирована (не зависит ни от момента инерции, ни от момента импульса) и замечательным образом совпадает с собственной частотой *колебаний* маятника с идентичными параметрами [9].

Кинематика стабилизированного ротатора

Момент импульса стабилизированного ротатора равен

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

Здесь J — момент инерции; $x_\omega = \sqrt{mk}$ — волновой реактанс [10].

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

тогда

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

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, может развиваться как сжатие, так и 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 ω_0 центробежная сила $m\omega^2 r$ 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 ω_0 :

$$t_0 = \frac{\omega_0 mr_0^2}{M} = \frac{\sqrt{mkr_0^2}}{M} = \frac{L_0}{M}.$$

При дальнейшем нагружении стабилизированного ротатора вращающим моментом его динамика (нелинейный участок) описывается системой двух дифференциальных уравнений — вращательного и поступательного (радиального):

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

Трение здесь не учитывается.

Начальные условия:

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

Из системы уравнений и начальных условий следует

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt}\bigg|_{t=t_0} &= \frac{M}{mr_0^2}; \\ \frac{d^2 \omega}{dt^2} &= -2 \frac{M}{mr^3} \frac{dr}{dt}, \quad \frac{d^2 \omega}{dt^2}\bigg|_{t=t_0} = 0; \\ \frac{d^2 r}{dt^2} &= (\omega^2 - \omega_0^2)r, \quad \frac{d^2 r}{dt^2}\bigg|_{t=t_0} = 0; \\ \frac{d^3 r}{dt^3} &= 2\omega \frac{d\omega}{dt} r + (\omega^2 - \omega_0^2) \frac{dr}{dt}; \\ \frac{d^3 r}{dt^3}\bigg|_{t=t_0} &= 2\omega_0 \frac{M}{mr_0^2} r_0 = 2\omega_0 \frac{M}{mr_0}; \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

Подобно тому как при вынужденных колебаниях маятника частота не совпадает с собственной частотой [11–15], частота вращения стабилизированного ротатора при нагружении не совпадает с собственной частотой вращения.

Из соотношения (2) следует, что чем меньше момент M и больше m и r_0 , тем меньше отклонение частоты вращения ω от собственной ω_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

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

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 $a = 1$ $\frac{d^2 r}{dt^2} = 0$, $\frac{dr}{dt} = V = \text{const}$, $r = r_{01} + Vt$. Колебания не происходят.

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

Затухание колебаний в стабилизированном ротаторе принципиально не отличается от затухания в обычном маятнике.

Выбег ротатора в стабилизированном режиме

Минимальная полная энергия стабилизированного ротатора в стабилизированном ре-

жипе соответствует статическому смещению груза r_0 :

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

Максимальная полная энергия теоретически неограниченна, 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 ω от собственной ω_0 .

Заключение

Заявленная цель работы достигнута. 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.

Другими 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 и 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 вращения его конкурентные возможности неоспоримы и определяются предельной простотой конструкции.

Список литературы

1. Попов И. П. Антирезонанс — резонанс скоростей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20, № 6. С. 362—366. <https://doi.org/10.17587/mau.20.362-366>
2. Роров И. Р. Application of the Symbolic (Complex) Method to Study Near-Resonance Phenomena // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49, N. 12. P. 1053—1063. DOI: 10.3103/S1052618820120122
3. Попов И. П. Разновидности механической мощности // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 1. С. 19—23. DOI: 10.52261/02346206_2022_1_19
4. Горячев О. В., Ефромеев А. Г. Алгоритм управления приводом стабилизации и изменения углового положения объекта с вращающимся основанием // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 3. С. 182—186. DOI: 10.17587/mau.16.182-186
5. Александров А. Ю., Александрова Е. Б. Одноосная стабилизация твердого тела при наличии запаздывания в обратной связи // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 12. С. 18—22.
6. Климина Л. А., Голуб А. П. Регулирование рабочих режимов ветроэнергетической установки с помощью дифференциальной планетарной передачи // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 4. С. 24—32.
7. Чичерова Е. В. Способы повышения качества управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 6. С. 402—408. DOI: 10.17587/mau.16.402-408
8. Титов Ю. К., Филиппенков Р. Г., Хижняков Ю. Н. Нейронечеткий регулятор частоты вращения силовой турбины твд на базе ANFIS-сети // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 10. С. 20—23.
9. Голицына М. В. Оптимальный выбор ускорения маятника в задачах управления вибрационным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 1. С. 31—39.
10. Попов И. П. Источники гармонических силы и скорости в мехатронных автоматических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 4. С. 208—216. <https://doi.org/10.17587/mau.22.208-216>
11. Wang Y., Duan X., Shao M., Wang C., Zhang H. An asymmetrical double torsion pendulum for studying coupled harmonic motion // American Journal of Physics. 2020. Vol. 88, N. 9. P. 760—768. DOI: 10.1119/10.0001613
12. Seekhao P., Parnichkun M., Tungpimolrut K. Development and control of a bicycle robot based on steering and pendulum balancing // Mechatronics. 2020. Vol. 69. P. 102386. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2020.102386
13. Wright J. A., Bartuccelli M., Gentile G. Comparisons between the pendulum with varying length and the pendulum with oscillating support // Journal of Mathematical Analysis and Applications. 2017. Vol. 449, N. 2. P. 1684—1707. DOI: 10.1016/j.jmaa.2016.12.076
14. Bamba K., Barrie N. D., Sugamoto A., Yamashita K., Takeuchi T. Ratchet baryogenesis and an analogy with the forced pendulum // Modern Physics Letters A. 2018. Vol. 33, N. 17. P. 1850097. DOI: 10.1142/S0217732318500979
15. Xu K., Hua X., Chen Z., Lacarbonara W., Huang Z. Exploration of the nonlinear effect of pendulum tuned mass dampers on vibration control // Journal of Engineering Mechanics ASCE. 2021. Vol. 147, N. 8. P. 0001961. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001961

Stabilized Rotator for Mechatronic Automatic Systems

I. P. Popov, ip.popov@yandex.ru,

Kurgan State University, Kurgan, 640020, Russian Federation

Corresponding author: Popov Igor P., Senior Lecturer, Kurgan State University, Kurgan, 640020, Russian Federation, e-mail: ip.popov@yandex.ru

Accepted on June 28, 2022

Abstract

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

For citation:

Popov I. P. Stabilized Rotator for Mechatronic Automatic Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol.23, no. 10, pp. 523—528.

DOI: 10.17587/mau.23.523-528

References

1. **Popov I. P.** Antiresonance — velocity resonance, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 362—366, <https://doi.org/10.17587/mau.20.362-366> (in Russian).
2. **Popov I. P.** Application of the Symbolic (Complex) Method to Study Near-Resonance Phenomena, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, vol. 49, no. 12, pp. 1053—1063, DOI: 10.3103/S1052618820120122
3. **Popov I. P.** Varieties of mechanical power, *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2022, no. 1, pp. 19—23, DOI: 10.52261/02346206_2022_1_19 (in Russian).
4. **Goryachev O. V., Efromeev A. G.** Algorithm for controlling the stabilization drive and changing the angular position of an object with a rotating base, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 182—186, DOI: 10.17587/mau.16.182-186 (in Russian).
5. **Aleksandrov A. Yu., Aleksandrova E. B.** Uniaxial stabilization of a rigid body in the presence of feedback delay, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2014, no. 12, pp. 18—22 (in Russian).
6. **Klimina L. A., Golub A. P.** Regulation of the operating modes of a wind power plant using a differential planetary gear, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2014, no. 4, pp. 24—32 (in Russian).
7. **Chicherova E. V.** Methods for Improving the Quality of Speed Control of a Power Turbine of a Gas Turbine Engine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 402—408, DOI: 10.17587/mau.16.402-408 (in Russian).
8. **Titov Yu. K., Filippenkov R. G., Khizhnyakov Yu. N.** Neuro-Fuzzy Speed Controller of a HPT Power Turbine Based on the ANFIS Network, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2013, no. 10, pp. 20—23 (in Russian).
9. **Golitsyna M. V.** Optimal Choice of Pendulum Acceleration in Problems of Controlling a Vibrating Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 31—39 (in Russian).
10. **Popov I. P.** Sources of harmonic force and speed in mechatronic automatic systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 208—216, <https://doi.org/10.17587/mau.22.208-216> (in Russian).
11. **Wang Y., Duan X., Shao M., Wang C., Zhang H.** An asymmetrical double torsion pendulum for studying coupled harmonic motion, *American Journal of Physics*, 2020, vol. 88, no. 9, pp. 760—768, DOI: 10.1119/10.0001613
12. **Seekhao P., Parnichkun M., Tungpimolrut K.** Development and control of a bicycle robot based on steering and pendulum balancing, *Mechatronics*, 2020, vol. 69, pp. 102386, DOI: 10.1016/j.mechatronics.2020.102386
13. **Wright J. A., Bartuccelli M., Gentile G.** Comparisons between the pendulum with varying length and the pendulum with oscillating support, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2017, vol. 449, no. 2, pp. 1684—1707, DOI: 10.1016/j.jmaa.2016.12.076
14. **Bamba K., Barrie N. D., Sugamoto A., Yamashita K., Takeuchi T.** Ratchet baryogenesis and an analogy with the forced pendulum, *Modern Physics Letters A*, 2018, vol. 33, no. 17, pp. 1850097, DOI: 10.1142/S0217732318500979
15. **Xu K., Hua X., Chen Z., Lacarbonara W., Huang Z.** Exploration of the nonlinear effect of pendulum tuned mass dampers on vibration control, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 2021, vol. 147, no. 8, pp. 0001961, DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001961



XX НАЦИОНАЛЬНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИСКУССТВЕННОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ (КИИ-2022)

г. Москва, с 21 по 23 декабря 2022 г.

Основные направления конференции

- Инженерия знаний
- Интеллектуальный анализ данных
- Интеллектуальный анализ текстов и семантический Web
- Когнитивные и психологические исследования в искусственном интеллекте
- Моделирование рассуждений и неклассические логики
- Нечеткие модели и мягкие вычисления
- Интеллектуальные системы поддержки принятия решений и управления
- Многоагентные системы и искусственные сообщества
- Робототехнические системы
- Нейросетевые методы, нейроинформатика
- Эмоции и образы в искусственном интеллекте
- Компьютерное зрение
- Объясняемый искусственный интеллект в критических приложениях
- Инструментальные средства конструирования интеллектуальных систем
- Интеллектуальные технологии и прикладные интеллектуальные системы

Основные контакты

По вопросам подачи докладов: *Виноградов Дмитрий Вячеславович*, krrquest@tandex.ru

По общим вопросам: *Борисов Вадим Владимирович*, vbor67@mail.ru