

15. Daneev A.V., Rusanov V.A., Sharpinskii D.Yu. Nestatsionarnaya realizatsiya Kalmana – Mesarovicha v konstruktsiyakh operatora Releya–Rittsa [Non-stationary realization of Kalman-Mesarovich in the constructions of the Rayleigh-Ritz operator]. *Kibernetika i sistemnyi analiz [Cybernetics and system analysis]*, 2007. No. 1. Pp. 82–91.

16. E.P. Boiko, Yu.V. Gaintsev, Yu.M. Kovalyov et al. Asinkhronnye dvigateli obshchego naznacheniya [Asynchronous motors of general purpose]. In Petrov V.M. and Kravchik A.E. (eds) Moscow: Energoizdat Publ., 1980. 488 p.

17. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electric cars. AC machines]. St. Petersburg: Piter Publ., 2007. 320 p.

18. Bespalov V.Ya., Kotelenets N.F. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. Moscow: Academy Publishing center, 2010. 320 p.

19. Kopylov I.P. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola; Logos Publ. 2006. 680 p.

20. Ter-Gazaryan G.N. Nesimmetrichnye rezhimy sinkhronnykh mashin [Asymmetrical modes of synchronous machines]. Moscow: Energiya Publ., 1969. 214 p.

### Информация об авторах

**Данеев Алексей Васильевич** – профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: daneev@mail.ru

**Данеев Роман Алексеевич** – доцент кафедры информационно-правовых дисциплин, Восточно-Сибирский институт МВД России, e-mail: romasun@mail.ru

**Сизых Виктор Николаевич** – профессор кафедры автоматизации производственных процессов, Иркутский государственный университет путей сообщения, e-mail: szych\_vn@mail.ru

### Information about the authors

**Aleksei V. Daneev** – Professor of the Subdepartment of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, e-mail: daneev@mail.ru

**Roman A. Daneev** – Associate Professor of the Subdepartment of Information technologies, East-Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, e-mail: romasun@mail.ru

**Viktor N. Szykh** – Professor of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, e-mail: szych\_vn@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).24-30

УДК 621.833.65

## Суперпозиция вращений в механизмах

**И. П. Попов**✉

*Курганский государственный университет, г. Курган, Российская Федерация*

✉ ip.popov@yandex.ru

### Резюме

Предпосылкой рассмотрения суперпозиции вращений в механизмах является принцип суммирования прямолинейных равномерных движений. Цель работы – установить, как в подобной ситуации обстоит дело при сложении вращательных синхронных или кратных движений. Задачи исследования состоят в аналитическом описании и построении годографов комбинированных вращательных механических движений. Практический аспект темы определяется тем, что во многих механизмах, таких как мультиинертный осциллятор, планетарные передачи, приводы фрез в машинах для очистки труб больших диаметров и т. п. реализуется суммирование вращательных движений, и форма годографа является полезной информацией при проектировании подобных устройств. Установлено, что подобно тому, как результатом сложения двух равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение, результатом сложения двух равномерных однонаправленных круговых движений является также равномерное круговое движение. Годографом при сложении двух равномерных противоположно направленных круговых движений будет эллипс. В частном случае эллипс может вырождаться в отрезок прямой линии. Определены характеристики эллиптического годографа, в том числе большая и малая полуоси, корни характеристического уравнения, эксцентриситет, фокусы, угол наклона осей. Решена обратная задача – определение скоростей вращения по виду годографа. При сложении двух несинхронных вращений возможны годографы в виде улитки, имеющей сходство с улиткой Паскаля. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании механизмов, реализующих сложные вращательные движения.

### Ключевые слова

координаты, вращательные движения, вектор, годограф, эллипс, улитка Паскаля

### Для цитирования

Попов И. П. Суперпозиция вращений в механизмах / И. П. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 24–30. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).24-30

### Информация о статье

поступила в редакцию: 17.03.2021, поступила после рецензирования: 20.03.2021, принята к публикации: 11.04.2021

## Superposition of rotations in mechanisms

I. P. Popov✉

Kurgan State University, Kurgan, the Russian Federation

✉ ip.popov@yandex.ru

**Abstract**

The prerequisite for consideration of the superposition of rotations in mechanisms is the principle of summation of rectilinear uniform movements. The purpose of the work is to establish how things are in a similar situation when adding rotational synchronous or multiple motions. The objectives of the research are the analytical description and construction of hodographs of combined rotational mechanical motions. The practical aspect of the topic is determined by the fact that in many mechanisms, such as a multi-inert oscillator, planetary gears, cutter drives in machines for cleaning pipes of large diameters, etc. summation of rotational motions is realized, and the shape of the hodograph is useful information in the design of such devices. It was found that, just as the result of the addition of two uniform rectilinear motions is also a uniform rectilinear motion, the result of the addition of two uniform unidirectional circular motions is also a uniform circular motion. When two uniform oppositely directed circular motions are added, the hodograph is an ellipse. In a particular case the ellipse can degenerate into a straight line segment. The characteristics of the elliptical hodograph are determined, including major and minor semiaxes, roots of the characteristic equation, eccentricity, foci, angle of inclination of the axes. The inverse problem – determination of the rotation speeds by the type of the hodograph – is solved. When two asynchronous rotations are added, the occurrence of hodographs in the form of a snail is possible, which is similar to Pascal's snail. The results obtained can be used in the design of mechanisms that implement complex rotational motions.

**Keywords**

coordinates, rotational motions, vector, hodograph, ellipse, Pascal's snail

**For citation**

Popov I.P. Superpozitsiya vrashchenii v mekhanizmax [Superposition of rotations in mechanisms]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 24–30. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).24-30

**Article info**

Received: 17.03.2021, Revised: 20.03.2021, Accepted: 11.04.2021

**Введение**

Если система отсчета  $x'O'y'$  движется прямолинейно и равномерно со скоростью  $V_1$  в неподвижной системе отсчета  $xOy$  (рис. 1), и точка  $a$  движется прямолинейно и равномерно со скоростью  $V_2$  в системе отсчета  $x'O'y'$ , то в соответствии с принципом относительности Галилея точка  $a$  движется прямолинейно и равномерно со скоростью  $V_3$  в системе отсчета  $xOy$ , а годографом вектора  $A$ , соединяющего точки  $O$  и  $a$ , является прямая линия [1, 2].

Цель работы – установить, как в подобной ситуации обстоит дело при сложении вращательных синхронных движений [3–5]. Задачи исследования состоят в аналитическом описании и построении годографов движений.

Актуальность настоящего исследования определяется тем, что во многих механизмах, таких как мультиинертный осциллятор [6, 7], планетарные передачи [8–11], приводы фрез в машинах для очистки труб больших диаметров [12] и т. п. реализуется суммирование вращательных движений, и форма годографа является полезной информацией при проектировании подобных устройств [13–18].

Пусть точка  $O'$  вращается вокруг точки  $O$  в системе отсчета  $xOy$  с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Расстояние  $\rho_1$  между точками не меняется. Координатные оси обеих систем отсчета всегда попарно параллельны. Точка  $a$  вращается вокруг точки  $O'$  в

системе отсчета  $x'O'y'$  с постоянной угловой скоростью  $-\omega$  или  $+\omega$ . Расстояние  $\rho_2$  между точками не меняется.

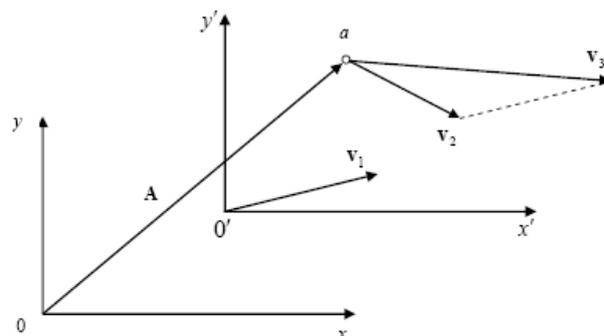


Рис. 1. Сложение движений  
Fig. 1. Addition of motions

**Разнонаправленные вращения**

**Теорема 1.** При разнонаправленных вращениях точек  $a$  и  $O'$  годографом вектора  $A$  является эллипс.

*Доказательство.*

Координаты точки  $O'$  в системе  $xOy$ :

$$x_1 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad y_1 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1). \quad (1)$$

Координаты точки  $a$  в системе  $x'O'y'$ :

$$x_2 = \rho_2 \cos(-\omega t + \varphi_2), \quad y_2 = \rho_2 \sin(-\omega t + \varphi_2).$$

Здесь  $\varphi_1, \varphi_2$  – начальные углы.

Координаты вектора  $A$  в системе  $xOy$ :

$$x = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(-\omega t + \varphi_2),$$

$$y = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin(-\omega t + \varphi_2).$$

$$x = \cos \omega t (\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2) - \\ - \sin \omega t (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2),$$

$$y = \sin \omega t (\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2) + \\ + \cos \omega t (\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2).$$

Отсюда следует, что

$$\sin \omega t = \frac{y(\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2} -$$

$$- \frac{x(\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2},$$

$$\cos \omega t = \frac{x(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2} +$$

$$+ \frac{y(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2}.$$

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1,$$

$$\frac{y^2 (\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + x^2 (\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)^2}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} -$$

$$- \frac{2xy(\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)(\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{x^2 (\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + y^2 (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)^2}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{2xy(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{y^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} -$$

$$- \frac{4xy\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1. \quad (2)$$

Это уравнение эллипса.

Теорема доказана.

**Теорема 2.** Большая и малая полуоси эллипса (2) равны соответственно  $(\rho_1 + \rho_2)$  и  $|\rho_1 - \rho_2|$ .

*Доказательство.*

Обратным отсчетом времени можно добиться, чтобы  $\varphi_1 = \varphi_2$ , а поворотом координатных осей – чтобы  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ . Тогда (2) примет вид:

$$\frac{x^2 (\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} + \frac{y^2 (\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} + \frac{y^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} = 1 \quad (3)$$

(канонический вид).

Теорема доказана.

Следствие 1. При  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$  эллипс (2) вырождается в отрезок прямой линии длиной  $4\rho$ .

Следствие 2. Корни характеристического уравнения эллипса равны

$$\lambda_1 = (\rho_1 + \rho_2)^2, \lambda_2 = (\rho_1 - \rho_2)^2.$$

Следствие 3. Эксцентриситет эллипса равен отношению среднегеометрического значения величин  $\rho_1$  и  $\rho_2$  к их среднearифметическому значению:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\rho_1\rho_2}}{(\rho_1 + \rho_2)/2}.$$

Следствие 4. Фокусы эллипса (для канонической формулы (3)) равны

$$f_{1,2} = (\pm 2\sqrt{\rho_1\rho_2}, 0).$$

**Теорема 3.** Оси эллиптического годографа повернуты на угол  $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$  в системе отсчета  $xOy$ .

*Доказательство.*

При повороте координатных осей на угол  $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$  выражение (3) принимает вид:

$$\frac{\left(x \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + y \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} +$$

$$+ \frac{\left(-x \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + y \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{y^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} -$$

$$- \frac{4xy\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

что совпадает с (2).

Теорема доказана.

На (рис. 2)  $\varphi_1 = 120^\circ$ ,  $\varphi_2 = -30^\circ$ , следовательно, оси эллипса повернуты на  $45^\circ$ .

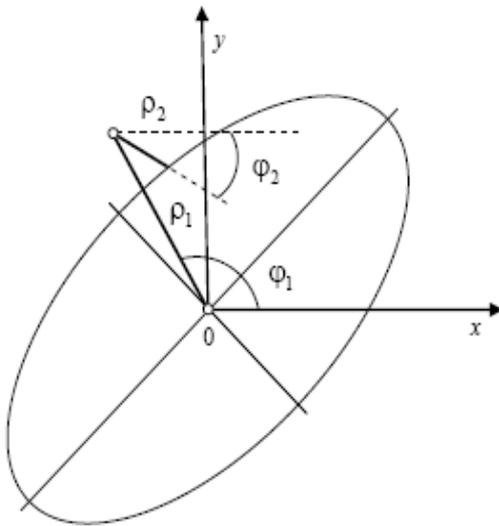


Рис. 2. Эллиптический годограф  
Fig. 2. Elliptical hodograph

**Теорема 4.** Доказывается обратным ходом рассуждений.

Если годографом вектора  $A$  является эллипс с полуосями  $(\rho_1 + \rho_2)$  и  $|\rho_1 - \rho_2|$ , то точка  $a$  вращается вокруг точки  $O'$  с постоянной угловой скоростью  $-\omega$  в системе отсчета  $x'O'y'$ .

**Однонаправленные вращения**

**Теорема 5.** При однонаправленных вращениях точек  $a$  и  $O'$  годографом вектора  $A$  является окружность с центром в точке  $O$ .

*Доказательство.*

Координаты точки  $O'$  в системе  $xOy$  определяются выражением (1).

Координаты точки  $a$  в системе  $x'O'y'$ :

$$x_2 = \rho_2 \cos(\omega t + \varphi_2), \quad y_2 = \rho_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Координаты вектора  $A$  в системе  $xOy$ :

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(\omega t + \varphi_2),$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Квадрат вектора  $A$  равен

$$\begin{aligned} A^2 = x_A^2 + y_A^2 &= \rho_1^2 \cos^2(\omega t + \varphi_1) + \rho_2^2 \cos^2(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ 2\rho_1\rho_2 \cos(\omega t + \varphi_1)\cos(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ \rho_1^2 \sin^2(\omega t + \varphi_1) + \rho_2^2 \sin^2(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ 2\rho_1\rho_2 \sin(\omega t + \varphi_1)\sin(\omega t + \varphi_2) = \\ &\dots \\ &= \rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \end{aligned}$$

Длина вектора  $A$  неизменна, следовательно, его годографом является окружность.

Теорема доказана.

**Следствие.** Вектор  $A$  вращается с угловой скоростью  $\omega$  в системе отсчета  $xOy$ .

Это вытекает из того, что форма треугольника  $OO'a$  неизменна, а его сторона  $OO'$  вращается с угловой скоростью  $\omega$ .

**Теорема 6.** Доказывается обратным ходом рассуждений.

Если годографом вектора  $A$  является окружность, то точка  $a$  вращается вокруг точки  $O'$  с постоянной угловой скоростью  $+\omega$  в системе отсчета  $x'O'y'$ .

**Теорема 7.** Если точка  $a$  неподвижна в системе отсчета  $x'O'y'$ , то годографом вектора  $A$  является окружность радиуса  $\rho_1$ , координаты центра которой в системе отсчета  $xOy$  равны  $x_{\rho_1} = \rho_2 \cos \varphi_2$ ,

$$y_{\rho_1} = \rho_2 \sin \varphi_2.$$

*Доказательство.*

Координаты точки  $O'$  в системе  $xOy$  определяются выражением (1).

Координаты точки  $a$  в системе  $x'O'y'$ :

$$x_2 = \rho_2 \cos \varphi_2, \quad y_2 = \rho_2 \sin \varphi_2.$$

Координаты вектора  $A$  в системе  $xOy$ :

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos \varphi_2,$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin \varphi_2,$$

$$x_A - \rho_2 \cos \varphi_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1),$$

$$y_A - \rho_2 \sin \varphi_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$(x_A - \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + (y_A - \rho_2 \sin \varphi_2)^2 = \rho_1^2.$$

Теорема доказана.

**Пример сложения кратных вращений**

Пусть точка  $a$  вращается вокруг точки  $O'$  в системе отсчета  $x'O'y'$  с постоянной угловой скоростью  $+2\omega$  и  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ .

Координаты точки  $O'$  в системе  $xOy$ :

$$x_1 = \rho_1 \cos \omega t, \quad y_1 = \rho_1 \sin \omega t.$$

Координаты точки  $a$  в системе  $x'O'y'$ :

$$x_2 = \rho_2 \cos 2\omega t, \quad y_2 = \rho_2 \sin 2\omega t.$$

Координаты вектора  $A$  в системе  $xOy$ :

$$x_A = \rho_1 \cos \omega t + \rho_2 \cos 2\omega t,$$

$$y_A = \rho_1 \sin \omega t + \rho_2 \sin 2\omega t.$$

Годограф вектора  $A$  (улитка) при  $\rho_1 = \rho_2$  изображен далее (рис. 3).

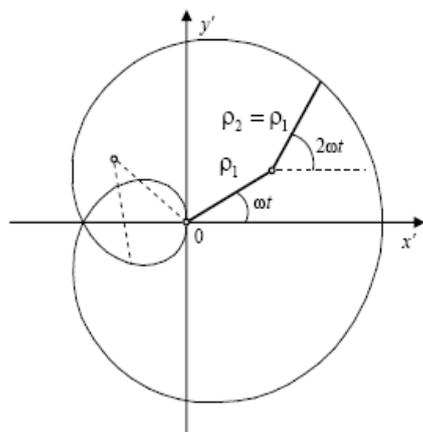


Рис. 3. Улиточный годограф  
Fig. 3. Snail hodograph

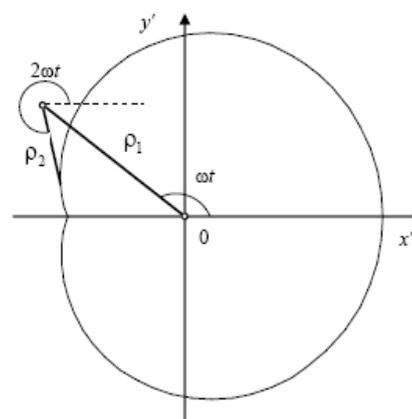


Рис. 4. Улиточный годограф без петли  
Fig. 4. Snail hodograph without a loop

Уравнение этой улитки в полярных координатах имеет вид:

$$\rho = \rho_1 \sqrt{2 + 2 \cos \frac{2}{3} \varphi}.$$

Для сравнения дана формула улитки Паскаля, имеющая заметное внешнее сходство, –

$$\rho = b + a \cos \varphi.$$

Условием возникновения петли улиточного годографа является неравенство

$$\rho_1 \sin \omega t < \rho_2 \sin 2\omega t,$$

$$\rho_1 \sin \omega t < \rho_2 2 \sin \omega t \cos \omega t,$$

$$\rho_1 < 2\rho_2 \cos \omega t.$$

При  $\rho_1 \geq 2\rho_2$  петля не возникает (рис. 4).

### Заключение

Подобно тому, как результатом сложения двух равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение, результатом сложения двух равномерных однонаправленных круговых движений является равномерное круговое движение.

Годографом при сложении двух равномерных противоположно направленных круговых движений является эллипс.

При сложении двух несинхронных вращений возможны годографы в виде улитки.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании механизмов, реализующих сложные вращательные движения.

### Список литературы

1. Дубровин А.С., Хабибулина С.Ю. Принцип иерархичности в информатике и принципы физической относительности Галилея, Пуанкаре, Логунова // Междунар. журн. экспериментал. образования. 2014. № 5-2. С. 137–139.
2. Чилин В.И., Муминов К.К. Классификация путей в геометрии Галилея // Тавр. вестн. информатики и математики. 2017. № 1 (34). С. 95–111.
3. Бранец В.Н. Об изоморфизме математических описаний операции вращения // Изв. РАН. МТТ. 2018. № 2. С. 136–143.
4. Бычков Ю.П. О катании тела с ротором по подвижной опорной сфере // Прикладная математика и механика. 2015. Т. 79. Вып. 1. С. 99–111.
5. Сеницкий Ю.Э., Сеницкий А.Ю. К проблеме разложения по собственным вектор-функциям в нестационарных начально-краевых задачах динамики оболочек вращения // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Физико-математические науки. 2004. № 30. С. 83–91.
6. Попов И.П. Теория мультиинертного осциллятора // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 1. С. 88–91.
7. Попов И.П. Моделирование триинертного осциллятора // Прикладная математика и вопросы управления. 2018. № 4. С. 73–79.
8. Приходько А.А., Смелягин А.И. Создание и исследование планетарных механизмов прерывистого движения с эллиптическими зубчатыми колесами // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2019. № 6 (129). С. 77–88.
9. Тимофеев Г.А., Самойлова М.В. Геометро-кинематическое исследование комбинированного планетарно-волнового механизма // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2012. № 1 (86). С. 70–80.
10. Борисенко Л.А., Калеев Д.Н. Типовой ряд планетарных механизмов на основе новой схемы двухступенчатого планетарного механизма // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. 2012. № 3 (36). С. 6–16.
11. Плеханов Ф.И., Молчанов С.М. Вопросы проектирования высоконагруженной планетарной передачи с роликовым механизмом снятия движения // Интеллектуальные системы в производстве. 2012. № 2 (20). С. 45–47.

12. Матасова Е.Ю., Виноградов Д.В. Корректировка подачи при фрезеровании криволинейных поверхностей // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. 2019. № 10 (715). С. 14–24.
13. Волошинов Д.В., Казначеева Е.С., Хайбрахманова Е.С. Преобразование инверсии в задачах проектирования поверхностей // Прикладная математика и вопросы управления. 2017. № 1. С. 14–26.
14. Маркеев А.П. О динамике спутника, несущего подвижную относительно него точечную массу // Изв. РАН. МТТ. 2015. № 6. С. 3–16.
15. Сумбатов А.С. О качении тяжелого диска по поверхности вращения отрицательной кривизны // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83. Вып. 2. С. 234–248.
16. Ван Л., Баранов А.А. Оптимальное удержание космического аппарата с двигателями малой тяги на солнечно-синхронной орбите // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2015. № 2 (101). С. 68–83.
17. Яшкин С.Н. К вопросу классификации вращений и связи мгновенных поворотов и непрерывных вращений // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2003. № 4. С. 3–15.
18. Усатая Т.В., Усатый Д.Ю., Свистунова Е.А. Трехмерное компьютерное моделирование в проектно-технологической деятельности // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 4 (10). С. 28–31.

### References

1. Dubrovin A.S., Khabibulina S.Yu. Printsip ierarkhichnosti v informatike i printsipy fizicheskoi otnositel'nosti Galileya, Puankare, Logunova [The principle of hierarchy in computer science and the principles of physical relativity of Galileo, Poincaré, and Logunov]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya [International journal of experimental education]*, 2014. No. 5-2. Pp. 137–139.
2. Chilin V.I., Muminov K.K. Klassifikatsiya putei v geometrii Galileya [Classification of paths in the geometry of Galileo]. *Tavrisheskii vestnik informatiki i matematiki [Tavrishesky bulletin of informatics and mathematics]*, 2017. No. 1 (34). Pp. 95–111.
3. Branets V.N. Ob izomorfizme matematicheskikh opisaniy operatsii vrashcheniya [On the isomorphism of mathematical descriptions of the rotation operation]. *Izv. RAN. MTT [News RAS. MTT]*, 2018. No. 2. Pp. 136–143.
4. Bychkov Yu.P. O katanii tela s rotorom po podvizhnoi opornoj sfere [On the rolling of a body with a rotor on a movable support sphere]. *PMM [PMM]*, 2015. Vol. 79, iss. 1. Pp. 99–111.
5. Senitskii Yu.E., Senitskii A.Yu. K probleme razlozheniya po sobstvennym vektor-funktsiyam v nestatsionarnykh nachal'no-krayevykh zadachakh dinamiki obolochek vrashcheniya [On the problem of expansion in terms of eigenvector functions in nonstationary initial-boundary value problems of the dynamics of shells of revolution]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [The bulletin of Samara State Technical University. Series: Physics and Mathematics]*, 2004. No. 30. Pp. 83–91.
6. Popov I.P. Teoriya mult'itnertnogo ostillyatora [The theory of a multi-inert oscillator]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii [Problems of mechanical engineering and automation]*, 2020. No. 1, pp. 88–91.
7. Popov I.P. Modelirovanie triinertnogo ostillyatora [Modeling a triinertial oscillator]. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya [Applied mathematics and control issues]*, 2018, No. 4. Pp. 73–79.
8. Prikhod'ko A.A., Smelyagin A.I. Sozdaniye i issledovaniye planetarnykh mekhanizmov preryvistogo dvizheniya s ellipticheskimi zubchatymi kolesam [Creation and research of planetary mechanisms of intermittent motion with elliptical gears]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie [The bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering]*, 2019. No. 6 (129). Pp. 77–88.
9. Timofeev G.A., SamoiloVA M.V. Geometro-kinematicheskoe issledovanie kombinirovannogo planetarno-volnovogo mekhanizma [Geometric-kinematic study of the combined planetary-wave mechanism]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie [The bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering]*, 2012. No. 1 (86). Pp. 70–80.
10. Borisenko L.A., Kaleev D.N. Tipovoi ryad planetarnykh mekhanizmov na osnove novoi skhemy dvukhstupenchatogo planetarnogo mekhanizma [A typical series of planetary mechanisms based on a new scheme of a two-stage planetary mechanism]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta [Bulletin of Belarusian-Russian University]*, 2012. No. 3 (36). Pp. 6–16.
11. Plekhanov F.I., Molchanov S.M. Voprosy proektirovaniya vysokonagruzhennoi planetarnoi peredachi s rolkovym mekhanizmom snyatiya dvizheniya [Issues of designing a highly loaded planetary gear with a roller mechanism for removing the motion]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve [Intelligent systems in production]*, 2012. No. 2 (20). Pp. 45–47.
12. Matasova E.Yu., Vinogradov D.V. Korrektirovka podachi pri frezerovanii krivolineinykh poverkhnostei [Correction of feed when milling curved surfaces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie [News of higher educational institutions. Mechanical engineering]*, 2019. No. 10 (715). Pp. 14–24.
13. Voloshinov D.V., Kaznacheeva E.S., Khaybrakhmanova E.S. Preobrazovanie inversii v zadachakh proektirovaniya poverkhnostei [Inversion transformation in surface design problems]. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya [Applied mathematics and control issues]*. 2017. No. 1. Pp. 14–26.
14. Markeev A.P. O dinamike sputnika, nesushchego podvizhnuyu otnositel'no nego tochechnuyu massu [On the dynamics of a satellite carrying a point mass moving relative to it]. *Izv. RAN. MTT [News RAS. MTT]*, 2015. No. 6. Pp. 3–16.
15. Sumbatov A.S. O kachenii tyazhelogo diska po poverkhnosti vrashcheniya otritsatel'noi krivizny [Rolling of a heavy disk on a surface of revolution of negative curvature]. *PMM [PMM]*, 2019. Vol. 83. No. 2. Pp. 234–248.
16. Van L., Baranov A.A. Optimal'noe uderzhanie kosmicheskogo apparata s dvigatelyami maloi tyagi na solnechno-sinkhronnoi orbite [Optimal retention of a spacecraft with low-thrust engines in a solar-synchronous orbit]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University.. Series: Mechanical Engineering]*, 2015. No. 2 (101). Pp. 68–83.

17. Yashkin S.N. K voprosu klassifikatsii vrashcheniy i svyazi mgnovennykh povorotov i nepreryvnykh vrashcheniy [On the question of the classification of rotations and the connection of instantaneous rotations and continuous rotations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'yemka* [News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography], 2003. No. 4. Pp. 3–15.

18. Usataya T.V., Usatyi D.Yu., Svistunova E.A. Trekhmernoe komp'yuternoe modelirovanie v proektno-tekhnologicheskoi deyatel'nosti [Three-dimensional computer modeling in design and technological activity]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production], 2015. No. 4(10). Pp. 28–31.

#### Информация об авторах

**Попов Игорь Павлович** – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, Курганский государственный университет, г. Курган, e-mail: ip.popov@yandex.ru

#### Information about the authors

**Igor' P. Popov** – Ph.D. of Engineering Science, Senior Lecturer of the Subdepartment of Mechanical Engineering, Metal-Cutting Machines and Tools, Kurgan State University, Kurgan, e-mail: ip.popov@yandex.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).30-36

УДК 621.398.001.2

## Методы эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения автоматизированной системы технологической подготовки производства коаксиальных радиокомпонентов для сверхвысокочастотной микроэлектроники спутниковой радиосвязи на железнодорожном транспорте

Ю. И. Карлина<sup>1</sup>✉, А. П. Хоменко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

<sup>2</sup> *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉ karlinigor@mail.ru

#### Резюме

Потребность в импортозамещении, проектировании и производстве аппаратуры связи для железнодорожного транспорта выдвигает требования по взаимодействию участников рынка радиоаппаратуры. Предложено использование методик цифровизации для создания цифрового двойника продукции и технологии его изготовления. Приведены основные параметры конструктора коаксиальных радиокомпонентов для сбора информации о требованиях потребителей. При формировании представительства предприятия-производителя коаксиальных радиокомпонентов необходимо создать конструктор изделия для подбора и моделирования конструкции и характеристик потребителями продукции. Основные параметры конструктора должны включать в себя нормируемые характеристики с диапазоном допустимых значений по видам изделий. Сбор и обработка информации об использовании конструктора потребителями позволит начать формировать цифровой портрет потребителя, данные о котором должны быть дополнены информацией из других источников, в том числе не формализуемой информацией, получаемой из блогов, научных статей, тематических сообществ в Интернете. Создание цифрового двойника технологии производства коаксиальных радиокомпонентов позволит осуществлять дополнение и изменение параметров конструктора изделия по мере совершенствования технологий изготовления и расширения диапазона нормируемых характеристик, а данные цифрового портрета потребителя обозначат направления для совершенствования технологий и приведения их в соответствие требованиям потребителя. Возрастающие требования к аппаратуре передачи данных приводят к потребности применения новых изоляционных материалов, обеспечивающих радиационную стойкость и диэлектрическую проницаемость коаксиальных радиокомпонентов, оборудования, оснащенного программируемыми логическими контроллерами и техническими системами регулирования. Необходимым условием для обеспечения работоспособности автоматизированной системы технологической подготовки производства является применение высокоточных станков с числовым программным управлением для микромеханики, контрольно-измерительных машин, автоматизированных линий для гальванического покрытия и сборки, способных передавать данные о выполненных операциях и устанавливать рассчитанные в автоматизированной системе технологической подготовки производства параметры обработки с учетом фактических параметров качества, полученных на предыдущих операциях.

#### Ключевые слова

моделирование, информационное обеспечение автоматизированной системы технологической подготовки производства, коаксиальные радиокомпоненты, электроника, радиосвязь на железнодорожном транспорте, параметризация

#### Для цитирования

Карлина Ю. И. Методы эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения автоматизированной системы технологической подготовки производства коаксиальных радиокомпонентов для сверхвысокочастотной микроэлектроники спутниковой радиосвязи на железнодорожном транспорте /