

## Алгоритм синтеза системы управления с фазосдвигающим фильтром обобщенным методом Галеркина

А. В. Статкевич

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения  
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А

**Аннотация.** В данной работе исследуется актуальная инженерная задача – синтез параметров системы с переменной структурой. Основным предмет исследования – система управления, включающая фазосдвигающий фильтр. Фазосдвигающие фильтры широко применяются в современной цифровой обработке сигналов. Их ключевые преимущества – гибкость настройки и высокая точность реализации требуемых характеристик – делают их незаменимыми в таких областях, как телекоммуникации, радиолокация, аудиотехника, системы автоматического управления. Требуется синтезировать параметры системы, обеспечивающие следующие условия: устойчивость работы, требуемые динамические характеристики, минимизация ошибок слежения, адаптивность к изменению внешних условий.

**Цель исследования** – разработка эффективного подхода к настройке систем управления, содержащих фазосдвигающие фильтры.

**Результаты.** Построена математическая модель нестационарной системы с изменяющейся структурой; в качестве синтеза системы автоматического управления с переменной структурой предложен синтез обобщенным методом Галеркина; разработан алгоритм синтеза системы автоматического управления с изменяющейся структурой на примере фазосдвигающего фильтра обобщенным методом Галеркина.

**Выводы.** Предложенный подход открывает новые возможности для создания эффективных, гибких и надежных систем управления с фазосдвигающими фильтрами.

**Ключевые слова:** фазосдвигающий фильтр, скользящее движение, система с переменной структурой, обобщенный метод Галеркина, система с переменной структурой, нестационарная система, синтез систем автоматического управления, математическое описание, дифференциальное уравнение системы управления, система автоматического управления

Поступила 21.10.2025, одобрена после рецензирования 18.01.2026, принята к публикации 25.03.2026

**Для цитирования.** Статкевич А. В. Алгоритм синтеза системы управления с фазосдвигающим фильтром обобщенным методом Галеркина // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 2. С. 25–33. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-2-25-33

## Synthesis algorithm for a phase shift control system using generalized Galerkin method

A.V. Statkevich

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
67, Let. A, Bolshaya Morskaya street, Saint-Petersburg, 190000, Russia

**Abstract.** This paper examines a pressing engineering problem: synthesizing the parameters of a system with a variable structure. The primary subject of the study is a control system incorporating a phase-shifting filter. Phase-shifting filters are widely used in modern digital signal processing. Their key advantages – flexible configuration and high accuracy in achieving the required characteristics – make them indispensable in areas such as telecommunications; radar; audio equipment; and automatic control systems. The objective is to synthesize system parameters that ensure the following conditions: operational stability; required dynamic characteristics; minimization of tracking errors; and adaptability to changing external conditions.

**Aim.** The study is to develop an effective approach to tuning control systems containing phase-shifting filters.

**Results.** A mathematical model of a non-stationary system with a variable structure was constructed; a generalized Galerkin method was proposed for synthesizing an automatic control system with a variable structure; an algorithm for synthesizing an automatic control system with a variable structure was developed using the generalized Galerkin method as an example of a phase-shifting filter.

**Conclusions.** The proposed approach opens new possibilities for creating efficient, flexible, and reliable control systems with phase-shifting filters.

**Keywords:** phase-shifting filter, sliding motion, variable-structure system, generalized Galerkin method, variable-structure system, non-stationary system, synthesis of automatic control systems, mathematical description, differential equation of a control system, automatic control system

Submitted 21.10.2025,

approved after reviewing 18.01.2026,

accepted for publication 25.03.2026

**For citation.** Statkevich A.V. Synthesis algorithm for a phase shift control system using generalized Galerkin method. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 2. Pp. 25–33. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-2-25-33

### ВВЕДЕНИЕ

Выбор конкретных фазосдвигающих фильтров при разработке алгоритмов управления зачастую обусловлен сложностями, возникающими в процессе вычисления производных системных координат. Именно технические ограничения при дифференцировании параметров системы во многом определяют целесообразность применения тех или иных типов фильтров в задачах синтеза управляющих воздействий [1–3]. Принцип переменной структуры представляет особый интерес при подборе фазосдвигающего фильтра. В результате формируется система, работающая аналогично подаче очищенной производной на вход неизменяемого компонента [4–5].

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ФАЗОСДВИГАЮЩИМ ФИЛЬТРОМ

Рассмотрим пример системы с фазосдвигающим фильтром, в котором мы имеем две линейные системы, причем принцип трансформации их конфигурации задается посред-



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ством логической функции. Формирование данной функции происходит благодаря двум ключевым характеристикам: значению рассогласования (ошибки) и сигналу на выходе инерционного компонента системы. Переменная структура инерционного звена обусловлена дискретными изменениями коэффициента усиления [6]. Поведение системы в динамике описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} x_1 = x(t), \\ \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -a_2x_2 - a_1x_1 - b\psi x_1, \\ \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{T}(\theta - \bar{\psi}x_1), \end{cases}$$

где  $x_1, x_2$  – координаты системы,  $a_1, a_2, b$  – постоянные параметры,  $\theta$  – выходная величина инерционного звена с постоянной времени  $T$ .

$$\psi = \begin{cases} k_1 & \text{при } y(t)x(t) > 0, \\ k_2 & \text{при } y(t)x(t) < 0, \end{cases} \tag{1}$$

где  $y(t)=cx(t)-\theta$ ,  $k_1, k_2, c$  – постоянные коэффициенты.

Переменные коэффициенты инерционного звена  $\bar{\psi}$  меняются по закону [5–6]

$$\bar{\psi} = \begin{cases} \bar{k}_1 & \text{при } x(t)y(t) > 0, \\ \bar{k}_2 & \text{при } x(t)y(t) < 0, \end{cases} \tag{2}$$

где  $\bar{k}_1, \bar{k}_2$  – постоянные коэффициенты.

Согласно (1) и (2) величина  $k$  равна разнице  $\bar{k}_2$  и  $\bar{k}_1$ . Величина  $\bar{\alpha}$  равняется значению постоянного коэффициента  $k_1$ .

Структурная схема фазосдвигающего фильтра представлена на рис. 1.

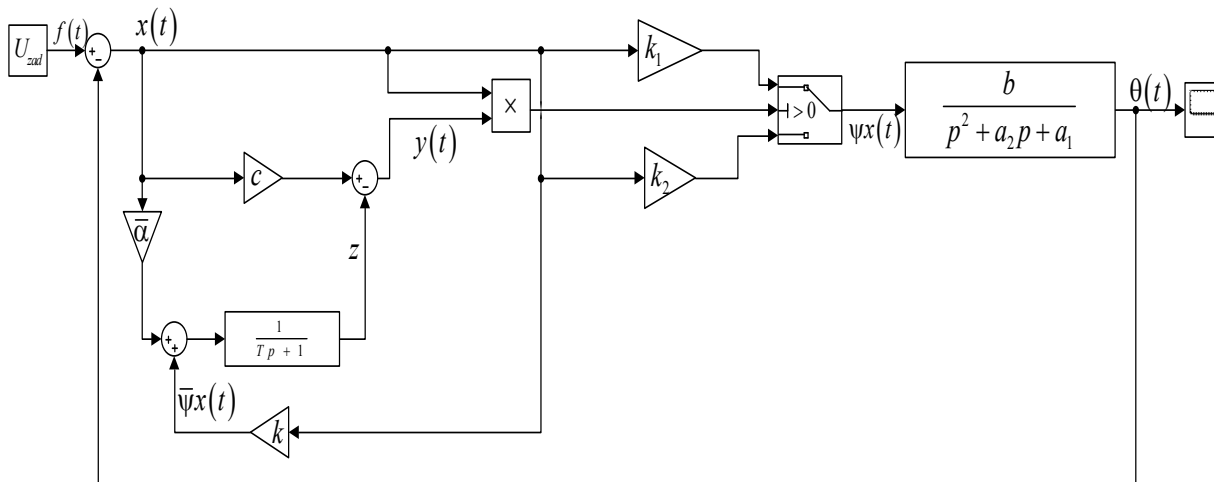


Рис. 1. Структурная схема фазосдвигающего фильтра с переменной структурой

Fig. 1. Structural diagram of a phase-shifting filter with variable structure

Фазосдвигающие фильтры с коммутируемым коэффициентом усиления открывают возможность создания систем, способных в заданной области фазовой плоскости имитировать работу линейных систем с управлением по ошибке и ее производной. Важное преимущество систем с переменной структурой – достижение аналогичного эффекта без необходимости измерения производной [7].

В работах [6–8] показано, что в структуре фазосдвигающего фильтра с переменной структурой возможен скользящий режим.

#### АЛГОРИТМ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ОБОБЩЕННЫМ МЕТОДОМ ГАЛЕРКИНА

При разработке системы автоматического управления (САУ) учитываются ограничения, определяющие допустимые значения варьируемых параметров согласно условиям технической задачи [9–10]

$$c_k^- \leq c_k \leq c_k^+, \quad k = 1, 2, \dots, m,$$

где  $c_k^+$  – максимальное допустимое значение варьируемых параметров;  $c_k^-$  – минимальное допустимое значение варьируемых параметров.

Существующий алгоритм решения обладает верхним порогом точности, который может быть математически описан следующим образом [11]:

$$\Delta = \frac{\delta c_k}{c_k} \leq \Delta^0,$$

где  $\Delta^0$  – заданное значение грубости системы;  $\delta c_k$  – вариация параметров, в пределах которых обеспечивается устойчивость системы.

Рассмотрим систему, представленную на рисунке, разбив ее на два режима работы. Первый режим при значении  $x(t)y(t) > 0$ , второй режим работы при значении  $x(t)y(t) < 0$ .

Требуемое программное движение зададим в следующем виде:

$$x^0(t) = \Omega^0(t) + \sum_{i=1}^l a_i \Omega_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, l,$$

где  $\Omega^0(t) = \omega_0(t)1(t)$  – функция, удовлетворяющая заданным граничным условиям;  $\Omega_i(t) = \omega_i(t)1(t)$  – функция, удовлетворяющая однородным граничным условиям;  $a_i$  – известные коэффициенты.

Работа САУ в первом и втором режимах при взаимодействии с входом нелинейного элемента описывается с помощью соответствующих уравнений:

$$\begin{aligned} x(t) &= f(t) - \theta(t), \\ \theta(t) &= x(t) k_{1,2} \frac{b}{p^2 + a_2 p + a_1}, \\ f(t) &= x(t) \left[ \frac{p^2 + a_2 p + a_1 + k_{1,2} b}{p^2 + a_2 p + a_1} \right], \\ f(t)(p^2 + a_2 p + a_1) &= x(t)(p^2 + a_2 p + a_1 + k_{1,2} b), \end{aligned} \tag{3}$$

где  $x(t)$  – исследуемая координата на входе регулятора.

Математическое описание динамики системы с переменной структурой в обобщенном виде реализуется через дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} Q(c_k, D)x(t) + R(c_k, D)\theta(t) &= S(c_k, D)f(t), \\ \theta(t) &= F[x(t), \dot{x}(t)], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $D$  – оператор обобщенного дифференцирования;  $f(t)$  – внешнее входное воздействие;  $x(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  – исследуемая координата на входе нелинейного элемента, относительно которой записано уравнение движения синтезируемой САУ.

Представленная на рисунке система характеризуется переменной структурой, изменения которой происходят благодаря нелинейному элементу (НЭ) – реле с зоной гистерезиса, стремящейся к нулю. В данном случае работа системы описывается через дифференциальные уравнения.

Далее получим невязку из уравнений (3) и (4) благодаря подстановке желаемого программного движения в уравнение движения системы:

$$\psi(t) = Q(c_k, D)x^0(t) + R(c_k, D)F[x^0(t), D\{x^0(t)\}] - S(c_k, D)f(t).$$

Уравнение движения системы для первого и второго динамического режима принимает следующий вид:

$$\psi(t) = x^0(t)(p^2 + a_2p + a_1 + k_{1,2}b) - f(t)(p^2 + a_2p + a_1).$$

В данном случае для решения задачи синтеза фазосдвигающего фильтра обобщенным методом Галеркина необходимо вычислить интеграл  $B_{qi}$  для двух режимов работы системы. Далее для возникновения в системе скользящего режима необходимо, чтобы первая производная программного движения была разрывной функцией – то есть вывести уравнение непрерывного движения системы.

Вычисляется интеграл  $A_{qi}$  для колебательного затухающего процесса [11–13], который соответствует полному решению линейного дифференциального уравнения второго порядка:

$$A_{qi} = \int_0^{\infty} D^i \{x^0(t)\} e^{-\rho_q t} dt = A_q \rho_{q-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $A_q = x_y + \frac{H^* \rho_q}{\alpha + \rho_q}$ ,  $q = 1, 2, \dots, m$ .

Далее рассмотрим вычисления интеграла  $A_q$  для первого и второго режимов работы системы [14]:

$$\begin{aligned} A_{qi} &= \int_0^{\infty} D^i \{x(t)\} e^{-\rho_q t} dt, \\ x^0(t) &= He^{-\alpha t} \cos(\beta t + \varphi_0) \cdot 1(t), \\ F[x(t)] &= \int_0^{\infty} He^{-\alpha t} \cos(\beta t + \varphi_0) \cdot e^{-\rho_q t} \cdot 1(t) dt, \\ A_{q0} &= \int_0^{\infty} He^{-\alpha t} \cos(\beta t + \varphi_0) \cdot e^{-\rho_q t} dt. \end{aligned}$$

Далее вычисляем интеграл  $B_{qi}$  для каждого динамического режима на выходе НЭ – реле с гистерезисом:

$$B_{qi} = \int_0^{\infty} D^i \left\{ F[x^0(t)] \right\} e^{-\rho_q t} dt = \int_0^{\infty} D^i \left\{ \sum_{g=0}^l z_g (x^0(t))^g 1(t) \right\} e^{-\rho_q t} dt. \quad (5)$$

В данном случае интеграл из (5)  $B_{qi}$  соответствует аналитическому представлению эквивалентных преобразований нелинейных характеристик применительно к кусочно-линейным элементам [10–11].

Далее решаем систему из  $m$  алгебраических уравнений и определяем значение варьируемых параметров. Процесс нахождения оптимальных параметров при решении задачи синтеза осуществляется с учетом целого ряда технических ограничений. Эти ограничения определяются возможностями практической реализации системы и необходимостью обеспечения ключевых характеристик синтезируемой системы автоматического управления – ее устойчивости и робастности (грубости) при выбранных параметрах [15].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе структурного синтеза нелинейной системы управления, где применяются вариационные методы анализа (включая обобщенный метод Галеркина), обеспечение необходимых показателей качества функционирования системы возможно только при предварительном определении желаемого программного движения. В задачах идентификации требуется, чтобы заданное программное движение соответствовало порядку системы, которую необходимо идентифицировать. В то же время при синтезе нелинейных САУ не нужно, чтобы желаемое программное движение было равно порядку создаваемой системы. Подобная методология обусловлена фундаментальной проблемой: невозможно заблаговременно сформировать полностью реализуемую программу движения для нелинейной системы автоматического управления. Это связано с тем, что на сегодняшний день не существует универсального алгоритма для решения нелинейных дифференциальных уравнений, что существенно осложняет процесс предварительного проектирования траекторий движения системы. Алгоритм скользящего движения радикально упрощает разработку систем автоматического управления с нестационарной структурой. Это особенно заметно при использовании обобщенного метода Галеркина – для систем с переменной структурой задача становится значительно легче.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков И. Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой. М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977. 416 с.
2. Steinberger M. (ed.), Horn M. (ed.), Fridman L. (ed.). Variable-structure systems and sliding-mode control: from theory to practice. Springer International Publishing AG, 2020. 462 p. (Studies in systems, decision and control). DOI: 10.1007/978-3-030-36621-6
3. Barth A., Weise C., Reiger J. Application of higher-order sliding-modes to a ball and plate system in Proc. of 15-th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS), Graz, Austria, July 2018. Pp. 192–197.
4. Емельянов С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, 1967, 366 с.

5. Уткин В. И., Орлов Ю. В. Теория бесконечномерных систем управления на скользящих режимах. М.: Наука, 1990. 133 с.
6. Статкевич А. В., Шишляков В. Ф. Применение фазосдвигающих фильтров для решения задачи синтеза // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: сборник тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 6 ноября 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. С. 281–283.
7. Статкевич А. В., Шишляков В. Ф. Системы с переменной структурой на примере скользящего режима работы // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXVII Междунар. науч. конф. (СПб., 3–7 июня 2024 г.): сб. статей: в 3 ч. Ч. 3. СПб.: ГУАП, 2024. 329 с.
8. Уткин В. И. Скользящий режим и их применения в системах с переменной структурой. М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1974. 272 с.
9. Решетникова Н. В. Применение метода электронной коммутации при синтезе нестационарных систем автоматического управления // Инженерный вестник Дона. 2025. № 7(127). С. 445–454. EDN: DZYATZ
10. Ватаева Е. Ю. Параметрический синтез маломощной потенциометрической следящей системы // Труды МАИ. 2024. № 134. EDN: FUSCJQ
11. Шишляков Д. В., Шишляков В. Ф., Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю. Синтез многосвязных САУ при полиномиальной аппроксимации нелинейных характеристик // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: сборник тезисов докладов IV Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 6 ноября 2024 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. С. 422–424.
12. Шишляков В. Ф., Шишляков А. В., Тимофеев С. С. Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: монография / Под ред. В. Ф. Шишлякова. СПб.: ГУАП, 2017.
13. Шишляков В. Ф. Синтез импульсных систем автоматического управления во временной области. Дисс. ... док-ра техн. наук: 05.13.01. Санкт-Петербург, 2001. 325 с.
14. Гречкин Н. Л., Ватаева Е. Ю., Шишляков Д. В. Решение задачи синтеза линейных САУ обобщенным методом Галеркина // Завалишинские чтения 23: сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербург, 18–19 апреля 2023 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. С. 96–98.
15. Криволапчук И. Г., Ватаева Е. Ю., Решетникова Н. В., Шишляков В. Ф. Регулятор на базе неточных множеств // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: сборник статей XXII Международной научной конференции: в 2-х частях. Часть 2. Санкт-Петербург, 3–7 июня 2019 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 257–262.

## REFERENCES

1. Kazakov I.E. *Statisticheskaya dinamika sistem s peremennoy strukturoy* [Statistical dynamics of systems with variable structure]. Moscow: Nauka, glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury izdatel'stva «Nauka», 1977. 416 p. (In Russian)
2. Steinberger M. (ed.), Horn M. (ed.), Fridman L. (ed.). Variable-structure systems and sliding-mode control: from theory to practice. *Springer International Publishing AG*, 2020. 462 p. (Studies in Systems, Decision and Control). DOI: 10.1007/978-3-030-36621-6

3. Barth A., Weise C., Reger J. Application of higher-order sliding-modes to a ball and plate system in Proc. of 15-th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS), Graz, Austria, July 2018. Pp. 192–197.
4. Yemelyanov S.V. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoy strukturoy* [Automatic control systems with variable structure]. Moscow: Nauka, 1967, 366 p. (In Russian)
5. Utkin V.I., Orlov Yu.V. *Teoriya beskonечnomernykh sistem upravleniya na skol'zyashchikh rezhimakh* [Theory of infinite-dimensional sliding mode control systems]. Moscow: Nauka, 1990. 133 p. (In Russian)
6. Statkevich A.V., Shishlakov V.F. Application of phase-shifting filters for solving the synthesis problem. *Matematicheskiye metody i modeli v vysokotekhnologichnom proizvodstve* [Mathematical Methods and Models in High-Tech Production]: collection of abstracts, IV International Forum in 2 parts. St. Petersburg, November 6, 2024. Pp. 281–283. (In Russian)
7. Statkevich A.V., Shishlakov V.F. Systems with variable structure: an example of a sliding mode of operation. XXVII Int. Sci. Conf. “*Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnyye sistemy*” [Wave Electronics and Infocommunication Systems]: St. Petersburg, June 3–7, 2024, collection of articles in 3 parts. Part 3, 329 p. (In Russian)
8. Utkin V.I. *Skol'zyashchiy rezhim i ikh primeneniya v sistemakh s peremennoy strukturoy* [Sliding mode and its applications in systems with variable structure]. Moscow: Nauka, glavnyaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1974. 272 p. (In Russian)
9. Reshetnikova N.V. Application of the electronic switching method in the synthesis of non-stationary automatic control systems. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2025. No. 7(127). Pp. 445–454. EDN: DZYATZ. (In Russian)
10. Vataeva E.Yu. Parametric synthesis for a low-power potentiometric tracking system. *Trudy MAI* [Proceedings of the MAI]. 2024. No. 134. EDN: FUSCJQ. (In Russian)
11. Shishlakov D.V., Shishlakov V.F., Grechkin N.L., Vataeva E.Yu. Synthesis of multivariable ACS with polynomial approximation of nonlinear characteristics. IV-th International Forum *Matematicheskiye metody i modeli v vysokotekhnologichnom proizvodstve* [Mathematical Methods and Models in High-Tech Production]: collection of abstracts in 2 parts. St. Petersburg, November 6, 2024. Pp. 422–424. (In Russian)
12. Shishlakov V.F., Shishlakov A.V., Timofeev S.S. *Sintez SAU pri razlichnykh vidakh approksimatsii nelineynykh kharakteristik: teoriya i praktika* [Synthesis of ACS with different types of approximation of nonlinear characteristics: theory and practice]: monograph. St. Petersburg: GUAP, 2017. (In Russian)
13. Shishlakov V.F. *Sintez impul'snykh sistem avtomaticheskogo upravleniya vo vremennoy oblasti* [Synthesis of pulse automatic control systems in the time domain]. Diss. ... Doctor of Technical Sciences: 05.13.01. St. Petersburg, 2001. 325 p. (In Russian)
14. Grechkin N.L., Vataeva E.Yu., Shishlakov D.V. Solution of the problem of synthesis of linear automatic control systems using the generalized Galerkin method. *Zavalishinskiye chteniya 23: Sbornik dokladov XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii po elektromekhanike i robototekhnike* [Zavalishinsky Readings 23: collection of papers of the XVIII International Conference on Electromechanics and Robotics] St. Petersburg, April 18–19, 2023. Pp. 96–98. (In Russian)
15. Krivolapchuk I.G., Vataeva E.Yu., Reshetnikova N.V., Shishlakov V.F. Regulator based on imprecise sets. *Sbornik statey v 2-h chastyakh XXII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: “Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnyye sistemy”* [Collection of papers in 2 parts of the XXII International Scientific Conference: “Wave Electronics and Infocommunication Systems”] St. Petersburg, June 3–7, 2019. Part 2. Pp. 257–262. (In Russian)

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

**Funding.** This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement No. FSRF-2023-0003, “Fundamental principles for constructing interference-resistant systems of space and satellite communications, relative navigation, machine vision, and aerospace monitoring”.

### **Информация об авторе**

**Статкевич Анастасия Вячеславовна**, ст. преподаватель кафедры управления в технических системах, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; 190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А; astat19@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5413-4938>, SPIN-код: 7825-7540

### **Information about the author**

**Anastasia V. Statkevich**, Senior Lecturer, Department of Management in Technical Systems, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; 67, Let. A, Bolshaya Morskaya street, Saint-Petersburg, 190000, Russia; astat19@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5413-4938>, SPIN-code: 7825-7540