

Алгоритмы модулей для реализации амплитудно-импульсной модуляции

Н.Л. Гречкин, Е.Ю. Ватаева

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка алгоритмов и подходов для эффективного синтеза регуляторов в системах автоматического управления (САУ) при наличии импульсной модуляции в системах, а также устранение недостатков классических методов синтеза, обусловленных отсутствием общей методологии проектирования систем с нелинейными характеристиками. **Метод.** Исследование базируется на обобщенном методе Галеркина и полиномиальной аппроксимации, позволяющих создавать математические модели импульсных модуляторов различного типа (идеальный импульсный элемент (ИИЭ), амплитудно – импульсный модулятор (АИМ I – рода) и АИМ II – рода). Применение данных моделей позволяет точнее учитывать реальные условия функционирования САУ и минимизировать влияние недостатков традиционных методов синтеза в теории автоматического управления. **Результат.** Разработаны алгоритмы преобразования непрерывных сигналов в импульсные формы, демонстрирующие высокую степень соответствия ожиданиям и требуемым техническим характеристикам. **Вывод.** Полученные результаты проверены путем компьютерного моделирования, подтвердившего работоспособность предложенных подходов, результаты моделирования приводятся.

Ключевые слова: импульсные системы, алгоритм, амплитудно-импульсный модулятор, обобщенный метод Галеркина, полиномиальная аппроксимация

Для цитирования: Н.Л. Гречкин, Е.Ю. Ватаева. Алгоритмы модулей для реализации амплитудно-импульсной модуляции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(3):29-37. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-29-37

Algorithms for Modules Implementing Amplitude Impulse Modulation

N.L.Grechkin, E.Yu. Vataeva

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
67 Bolshaya Morskaya Str., Saint-Petersburg 190000, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop algorithms and approaches for effective synthesis of controllers in automated control systems (ACS) that utilize amplitude impulse modulation (AIM), as well as address the shortcomings of classical synthesis methods caused by the lack of a unified methodology for designing systems with nonlinear characteristics. **Method.** The research relies on the generalized Galerkin method and polynomial approximation techniques to create mathematical models of different types of impulse modulators, including ideal impulse elements (IIEs), first-order amplitude-impulse modulators (AIM-I), and second-order amplitude-impulse modulators (AIM-II). These models allow for more accurate representation of real-world conditions in ACS operation and minimize the impact of traditional synthesis limitations in control theory. **Result.** Algorithms have been developed for converting continuous signals into discrete forms that demonstrate high conformity with expectations and required technical specifications. **Conclusion.** The proposed approach has been validated through computer simulations, confirming its effectiveness, and simulation results are presented.

Keywords: impulse systems, algorithm, amplitude impulse modulator, generalized Galerkin method, polynomial approximation

For citation: N.L. Grechkin, E.Yu. Vataeva. Algorithms for Modules Implementing Amplitude Impulse Modulation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(3):29-37. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-29-37

Введение. Современные технологии автоматизации активно развиваются, что приводит к требованию создания более сложных и эффективных методов синтеза. Однако существующие подходы к синтезу операторов управления систем автоматического управления (непрерывные и импульсные) часто не справляются с поставленными задачами, поскольку не существует единых подходов к синтезу систем автоматического управления (САУ) как с динамическими, так и статическими нелинейными характеристиками [1-5]. Поэтому создание единого программного комплекса, позволяющего с единых математических, методологических и алгоритмических подходов решать задачу параметрического синтеза является актуальной.

Постановка задачи. Импульсные САУ представляют собой особый класс динамических систем, отличающихся способом передачи информации. Вместо непрерывного сигнала, как в аналоговых системах, здесь используется дискретная последовательность импульсов, следующих друг за другом через определённые промежутки времени. Такая дискретизация является ключевой особенностью импульсных САУ. В качестве входного сигнала для модулятора выступает непрерывная функция, несущая в себе управляющую информацию. Важно отметить, что форма самих импульсов в несущей последовательности, как правило, остаётся постоянной, поскольку модуляция происходит за счёт изменения определённых параметров импульсов, отражающих информацию из входного сигнала [5-9]. К таким параметрам относятся амплитуда и длительность импульса. В зависимости от того, какой именно параметр импульса изменяется для кодирования информации, различают несколько типов импульсной модуляции: амплитудно – импульсная (АИМ) Наиболее распространёнными являются амплитудно-импульсная (АИМ), широтно-импульсная (ШИМ) и частотно-импульсная (ЧИМ). В рамках многих исследований используется именно АИМ. Использование импульсных модуляторов, и, следовательно, переход к дискретному представлению сигнала, существенно влияет на динамические характеристики всей системы автоматического управления.

Для упрощения математического анализа, часто используется идеализированная модель импульсного модулятора, генерирующего последовательность дельта-функций с постоянным периодом T . Такая модель удобна для анализа, но не отражает реальность, однако в реальных устройствах импульсы всегда имеют конечную длительность и амплитуду, поэтому необходимо учитывать

Для более точного описания реальных импульсных систем с учётом конечной длительности импульсов применяются более сложные математические модели, например АИМ I – рода и АИМ II – рода, данные модели учитывают не только амплитуду импульса, но и его длительность, что значительно усложняет математический анализ, но обеспечивает большую точность решения задачи синтеза операторов управления САУ. В данной статье рассматриваются алгоритмы модулей для реализации амплитудно- импульсной модуляции [9-14]. Описываемые модули входят в состав программного комплекса, предназначенного для унифицированного подхода к проектированию регуляторов САУ, обладающих как динамической, так и статической нелинейностью характеристик. Математической основой программного комплекса является обобщенный метод Галеркина

Методы исследования. В большинстве случаев, при анализе импульсных систем управления, импульсный модулятор рассматривается как идеальный, который с периодом T генерирует последовательность бесконечно коротких импульсов типа δ -функции [15, 16]. Площадь этих импульсов пропорциональна непрерывному сигналу на входе импульсного элемента в моменты времени $t = nT$:

$$x^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) \delta(t - nT),$$

где

$$x(nT) = \int_0^{\infty} x(t) \delta(t - nT) dt$$

– величина n -го дискретного значения; δ – задержанная импульсная функция, действующая при $t = nT$; T – период прерывания, представляющий собой интервал времени между соседними импульсами.

Таким образом, импульсный элемент можно рассматривать как эквивалент модулятора, в котором входной сигнал выступает в роли модулирующего, а последовательность единичных импульсов – в роли несущего сигнала. Несомненно, изображение амплитудно-импульсной модуляции в форме чередующихся дельта-последовательностей с амплитудной модуляцией не соответствует действительности, ведь ни один существующий генератор импульсов не способен создавать сигналы нулевой длительности и неограниченной интенсивности [15-17]. Использование такой математической модели допустимо, если продолжительность включённого состояния генератора составляет меньше пяти процентов относительно интервала между импульсами.

Реальные устройства АИМ не способны переключаться мгновенно. Когда важно учесть конечную длительность процесса включения-выключения, применяют специальные математические модели двух видов: типа I и типа II. Для АИМ первого типа характерна форма выходного сигнала в виде прямоугольных импульсов [15-17], высота которых прямо зависит от значения аналогового входа в фиксированные моменты выборки (рис. 1).

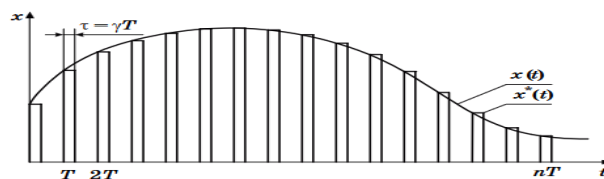


Рис.1 – Сигнал на выходе АИМ I

Fig. 1 – Signal at the output of the AIM I

Отличительной чертой второго типа является способность буквально «отсекать» сегменты исходного аналогового сигнала, создавая последовательность соответствующих интервалов (рис. 2).

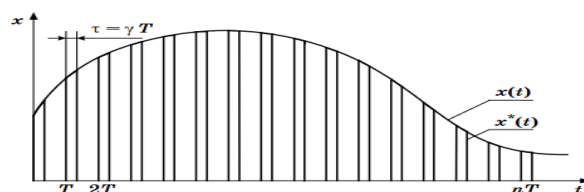


Рис. 2– Сигнал на выходе АИМ II

Fig. 2 – Signal at the output of AIM II

Сигнал на выходе импульсного элемента типа I описывается следующим образом:

$$x^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT) [1(t - nT) - 1(t - (nT + \tau))];$$

$$\tau = \gamma T, \quad 0 < \gamma \leq 1,$$

где τ – ширина импульса.

Сигнал на выходе импульсного элемента типа II описывается следующим образом:

$$x^*(t) = x(t) \sum_{n=0}^{\infty} [1(t - nT) - 1(t - (nT + \tau))];$$

$$\tau = \gamma T, \quad 0 < \gamma \leq 1,$$

где $x(t)$ – сигнал на входе модулятора.

Обсуждение результатов. Алгоритмы амплитудно – импульсных модуляторов.

Программный комплекс, реализующий синтез САУ методом Галеркина, включает модули, предназначенные для формирования программного движения в импульсных формах. Данные модули обеспечивают визуализацию процессов, происходящих как до прохождения сигналов через нелинейные элементы, так и после, что помогает лучше понимать динамику системы при её проектировании. Алгоритм преобразования непрерывного сигнала в выходной импульсный сигнал, соответствующий идеальной работе импульсного преобразователя, показан на рис.3.

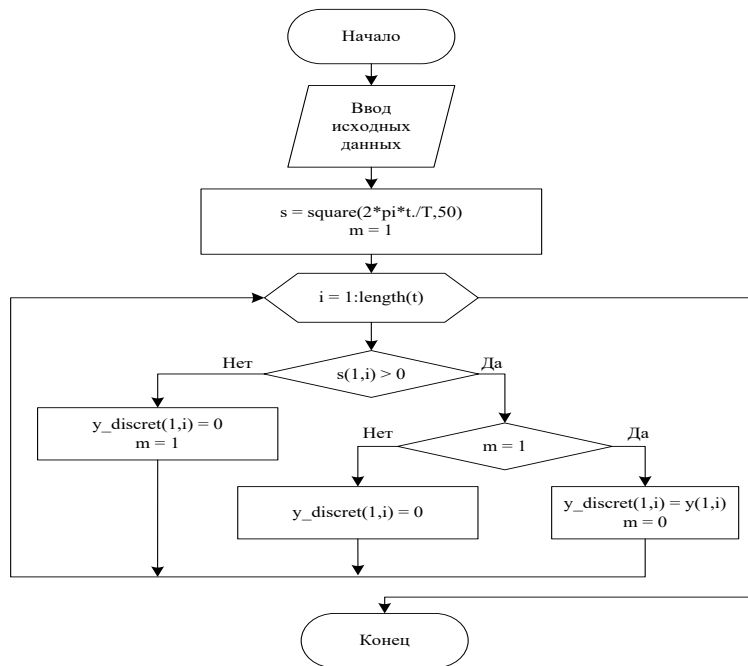


Рис. 3 – Алгоритм работы идеального АИМ

Fig. 3 – Algorithm of operation of an ideal AIM

Исходные данные алгоритма: массив t , содержащий временные точки от 0 до общего времени T_m с шагом Δt ; функция $y(t)$ – временная зависимость желаемых значений управляющего воздействия; T – период квантования импульсного модулятора.

Описание работы алгоритма:

1. До начала основного расчета вводится вспомогательная переменная m , устанавливаемая изначально в положение 1. Параллельно формируется переменная s , основанная на применении функции генерации импульсных сигналов *square*. Данная функция создаёт последовательность прямоугольных импульсов с граничными уровнями от +1 до -1 и периодом следования T .
2. Производится пошаговый перебор всех элементов массива t , двигаясь от первого элемента до последнего. Индекс шага i возрастает на единицу на каждой итерации. Процесс останавливается сразу после достижения последней точки. Итогом является создание матрицы $y_discret$.
3. Определяется уровень сигнала в точке $s(l,i)$. Если он положителен, то выполняется переход к шагу 4; в противном случае производится переход к шагу 7.
4. Если $m = 1$, то выполняется переход к шагу 5, в случае если $m \neq 1$, то осуществляется переход к пункту 6.
5. В матрицу $y_discret$ записывается текущее значение сигнала y . Переменной m присваивается значение 0.
6. В матрицу $y_discret$ записывается числовое значение 0.
7. В матрицу $y_discret$ записывается числовое значение 0. Переменной m присваивается значение 1.

Для проверки работоспособности алгоритма рассмотрим следующий пример. Предположим, что задан синусоидальный процесс, представленный на рис. 4.

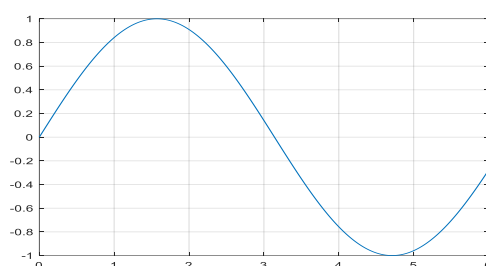


Рис. 4 – Синусоидальный процесс
 Fig. 4 – Sinusoidal process

Используя разработанный алгоритм (период квантования $T=0.1$), синусоидальный процесс преобразуется к виду, представленному на рис. 5.

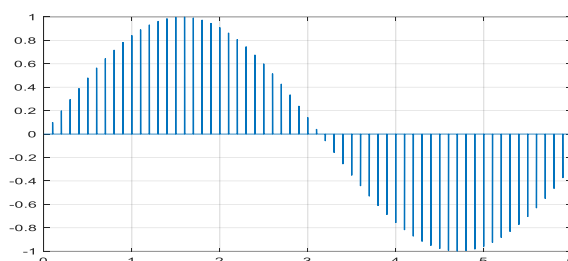


Рис. 5 – Модулированный сигнал
 Fig. 5 – Modulated signal

Алгоритм для преобразования непрерывного сигнала в сигнал, получающийся на выходе импульсного элемента 1-го рода, представлен на рис. 6.

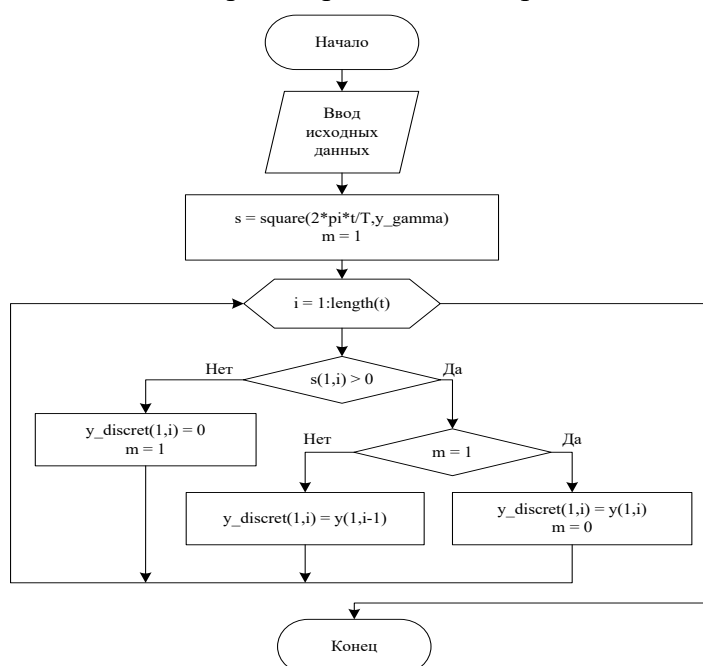


Рис. 6. – Алгоритм работы АИМ 1-го рода
 Fig. 6. – Algorithm of operation of the 1st type of AIM

Исходными данные алгоритма: массив t , содержащий временные точки от 0 до T_{nn} с шагом Δt ; переменная y – функция от t , содержащая в себе массив данных с учетом параметров желаемого программного движения; период квантования импульсного модулятора T ; относительная ширина каждого импульса γ , характеризующая коэффициент заполнения (ширину импульса в пределах периода).

Описание работы алгоритма:

1. При запуске программы создается вспомогательная переменная m , принимающая начальное значение 1. Одновременно строится набор значений s , формируемых функцией *square*, которая создает прямоугольные импульсы с уровнем ± 1 , заданным периодом T , а также шириной, регулируемой коэффициентом заполнения γ .
2. Программа последовательно обрабатывает каждую точку временного диапазона, увеличивая счётчик i от 1 до количества элементов во временном ряду t с шагом 1. По достижении последнего элемента цикл прекращается, результатом которого служит построенный импульсный процесс, заключённый в матрице $y_discret$.
3. Определяется уровень сигнала в точке $s(l,i)$. Если он положителен, выполняется следующая проверка (пункт 4); в противном случае производится переход к следующему этапу (пункт 7).
4. Если $m = 1$ процедура переходит к операции фиксации значения сигнала (пункт 5); если же не выполняется, то переходим к пункту 6.
5. Значение сигнала $y(i)$ фиксируется в соответствующей строке таблицы импульсных данных $y_discret$. m сбрасывается (т.е. присваивается 0), обозначая завершение фиксации текущего уровня.
6. Предыдущее записанное значение сохраняется в таблице импульсных данных, таким образом продлевая действие установленного уровня сигнала.
7. Матрица $y_discret$ записывается числовое значение 0 в первую строку i – го столбца. m присваивается числовое значение 1.

Чтобы убедиться в правильности функционирования алгоритма, проведем тестовое вычисление на примере синусоидальной зависимости. Применяя разработанный алгоритм с параметрами периода квантования $T=0.25$ и коэффициента заполнения $\gamma=0.8$, получаем результат преобразования исходного сигнала, показанного на рис.7.

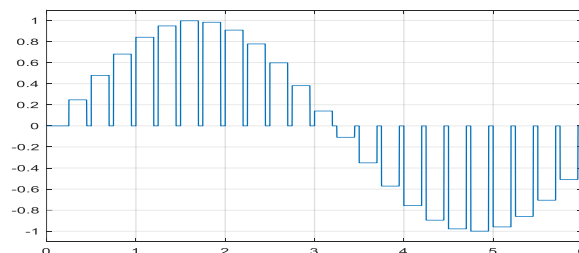


Рис. 7 – Модулированный сигнал

Fig. 7 – Modulated signal

Алгоритм для преобразования непрерывного сигнала в сигнал, получающийся на выходе импульсного элемента 2-го рода, представлен на рис.8.

Исходные данные алгоритма: массив t , содержащий временные точки от 0 до T_{nn} с шагом Δt ; переменная y – функция от t , содержащая в себе массив данных с учетом параметров желаемого программного движения; период квантования импульсного модулятора T ; относительная ширина каждого импульса γ , характеризующая коэффициент заполнения (ширину импульса в пределах периода).

Описание работы алгоритма:

1. Перед началом расчётов создаётся специальная переменная s , которая наполняется результатами функции *square*. Эта функция формирует серию прямоугольных импульсов с максимальным уровнем $+1$ и минимальным -1 , заданным периодом T и относительной шириной γ .
2. Осуществляется пошаговая проверка всех элементов массива t , начиная с первой точки и продолжая до последней включительно. На каждой итерации индекс i увеличивается на единицу. Итерация продолжается до тех пор, пока не будут пройдены все элементы массива. Результат процедуры — формирование матрицы $y_discret$, содержащей импульсные значения сигнала.

3. Каждая точка временного ряда проходит проверку по условию $s(l,i) > 0$. Если данное условие истинно, то осуществляется переход к шагу 4, в противном случае к шагу 5.
4. В таблицу импульсных данных $y_discret$ помещается текущее значение сигнала y в соответствующую ячейку строки.
5. В таблицу импульсных данных $y_discret$ помещается числовое значение 0 в соответствующую ячейку строки.

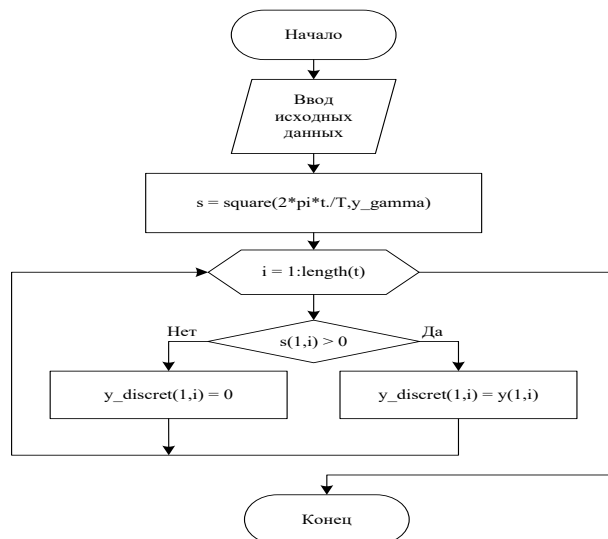


Рис. 8 – Алгоритм работы АИМ 2-го рода
 Fig. 8 – Algorithm of operation of the 2nd type AIM

Чтобы подтвердить работоспособность предложенного алгоритма, рассмотрим пример. Пусть исходным сигналом выступает синусоидальная волна (рис. 3). Посредством применения нашего алгоритма с выбранными параметрами — периодом квантования $T=0.45$ и коэффициентом заполнения импульса $\gamma=0.65$ — исходный синусоидальный сигнал преобразуется в импульсный режим, демонстрируемый на рис.9.

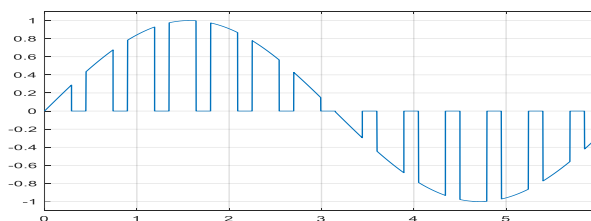


Рис. 9 – Модулированный сигнал
 Fig. 9 – Modulated signal

Вывод. В работе представлена разработка алгоритмов реализации АИМ в САУ. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения эффективности параметрического синтеза современных САУ, включая необходимость учета нелинейных свойств объектов управления. Теоретическая значимость работы заключается в том, что впервые созданы алгоритмы, позволяющие реализовать переход от непрерывной формы сигнала в импульсную для идеального импульсного элемента, АИМ I – рода и АИМ II – рода, с учетом особенностей каждого АИМа. Результаты моделирования подтверждают эффективность предложенных алгоритмов и пригодность их для практической реализации в проектировании САУ. Практическая значимость работы заключается в том, что представленные алгоритмы являются составной частью программного комплекса, ориентированного на решение задач синтеза регуляторов для САУ с нелинейными характеристиками (динамические и статические).

Благодарности. 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».

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement No. FSRF-2023-0003, "Fundamental Principles of Constructing Interference-Proof Systems for Space and Satellite Communications, Relative Navigation, Machine Vision, and Aerospace Monitoring."

Библиографический список:

1. Natalia Bakhtadze, Alexander Suleykin, Industrial digital ecosystems: Predictive models and architecture development issues, *Annual Reviews in Control*, Volume 51, 2021, pp. 56-64, ISSN 1367-5788, <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.11.001>
2. И.Б. Фуртат, П.А. Гушин, Нгуен Ба Хю, «Управление динамическими системами при ограничениях на входные и выходные сигналы», *Автомат. и телемех.*, 2023, № 4, 45–63; *Autom. Remote Control*, 84:4 (2023), 397–411. DOI: <https://doi.org/10.25728/arcRAS.2023.96.64.001>
3. Крук, А.Е. Синтез нелинейных импульсных систем управления при случайных воздействиях / А.Е. Крук, Л. А. Осипов // Информационно-управляющие системы. – 2012. – № 3(58). – С. 33-36.
4. Гайдук Анатолий Романович, Капустян Сергей Григорьевич, Алмашаал Мохаммад Джалаль Сравнение методов синтеза нелинейных систем управления // Вестник ИГЭУ. 2021. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-metodov-sinteza-nelineynyh-sistem-upravleniya>. (дата обращения: 11.06.2025)
5. Pyrkin A.A., Kolyubin S.A., Bobtsov A.A. Simple output controller for nonlinear systems with multisinusoidal disturbance // 21st Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2013, Conference Proceedings, 2013, pp. 1087-1091
6. Jingjing Gao, Xiangpeng Xie, A weighted switching sequence optimization algorithm for static output feedback control synthesis of nonlinear systems, *Applied Mathematics and Computation*, Volume 489, 2025, 129152, ISSN 0096-3003, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2024.129152>
7. Wang L., Ortega R., Bobtsov A. Observability is sufficient for the design of globally exponentially stable state observers for state-affine nonlinear systems // *Automatica*, 2023, vol. 149, pp. 11083.
8. Lai Wei, Ryan McCloy, Jie Bao, Control Contraction Metric Synthesis for Discrete-time Nonlinear Systems, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 54, Issue 3, 2021, Pages 661-666, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.317>
9. Wen-Chao HUANG, Hong-Fei SUN, Jian-Ping ZENG, Robust Control Synthesis of Polynomial Nonlinear Systems Using Sum of Squares Technique, *Acta Automatica Sinica*, Volume 39, Issue 6, 2013, Pages 799-805, ISSN 1874-1029, [https://doi.org/10.1016/S1874-1029\(13\)60055-5](https://doi.org/10.1016/S1874-1029(13)60055-5)
10. Бобцов А.А., Николаев Н.А., Козачёк О.А., Оськина О.В. Адаптивный наблюдатель переменных состояния нелинейной нестационарной системы с неизвестными постоянными параметрами и запаздыванием в канале измерений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 4. С. 850–853. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-850-853
11. Аносов В.Н., Кавешников В.М., Саидов С.А. Синтез нейрорегулятора мощности в системе бездатчикового тягового электропривода // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 31–35. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-31-35
12. Bernal Miguel, Sala Antonio, Lendek Zsafia, Guerra Thierry-Marie. Analysis and Synthesis of Nonlinear Control Systems: A Convex Optimisation Approach. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-90773-0
13. Ловчиков, А.Н. Анализ и синтез широтно-импульсных систем / А.Н. Ловчиков, Е.Е. Носкова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2010. – № 4(30). – С. 57-61.
14. Айтчанов, Б.Х. Структурный синтез частотно-импульсных систем управления с запаздыванием / Б.Х. Айтчанов // Труды университета. – 2003. – № 4. – С. 40-43.
15. Никитин А.В., Шишлаков В.Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография. - СПб: СПбГУАП., 2003. - 358 с.
16. Ватаева, Е.Ю. Параметрический синтез маломощной потенциометрической следящей системы / Е.Ю. Ватаева // Труды МАИ. – 2024. – № 134.
17. Ватаева, Е.Ю. Параметрический синтез потенциометрической маломощной следящей системы с импульсным элементом / Е.Ю. Ватаева // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 51-57.

References:

1. Natalia Bakhtadze, Alexander Suleykin, Industrial digital ecosystems: Predictive models and architecture development issues, *Annual Reviews in Control*, 2021;51:56–64. ISSN1367-5788. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.11.001>
2. Furtat I.B., P.A. Gushchin, Nguyen Ba Hu, “Control of dynamic systems with constraints on input and output signals”, *Autom. and Telemech.*, 2023; 4:45–63; *Autom. Remote Control*, 2023; 84 (4):397–411. DOI: <https://doi.org/10.25728/arcRAS.2023.96.64.001>

3. Kruk, A.E. Synthesis of nonlinear pulse control systems under random influences. A.E. Kruk, L.A. Osipov. *Information and control systems*. 2012;3 (58):33-36. (In Russ)
4. Gaiduk Anatoly Romanovich, Kapustyan Sergey Grigorievich, Almashal Mohammad Jalal Comparison of methods for synthesis of nonlinear control systems. *Bulletin of ISEU*. 2021;6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnienie-metodov-sinteza-nelineynyh-sistem-upravleniya> (access date: 06/11/2025). (In Russ)
5. Pyrkin A.A., Kolyubin S.A., Bobtsov A.A. Simple output controller for nonlinear systems with multisinusoidal disturbance. *21st Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2013, Conference Proceedings*, 2013:1087-1091
6. Jingjing Gao, Xiangpeng Xie, A weighted switching sequence optimization algorithm for static output feedback control synthesis of nonlinear systems. *Applied Mathematics and Computation*, 2025; 489,:129152, ISSN 0096-3003, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2024.129152>
7. Wang L., Ortega R., Bobtsov A. Observability is sufficient for the design of globally exponentially stable state observers for state-affine nonlinear systems. *Automatica*, 2023;149:11083.
8. Lai Wei, Ryan McCloy, Jie Bao, Control Contraction Metric Synthesis for Discrete-time Nonlinear Systems, *IFAC-PapersOnLine*, 2021;54(3):661-666. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.317>ISSN2405-8963
9. Wen-Chao HUANG, Hong-Fei SUN, Jian-Ping ZENG, Robust Control Synthesis of Polynomial Nonlinear Systems Using Sum of Squares Technique, *Acta Automatica Sinica*. 2013;39(6):799-805, ISSN 1874-1029, [https://doi.org/10.1016/S1874-1029\(13\)60055-5](https://doi.org/10.1016/S1874-1029(13)60055-5)
10. Bobtsov A.A., Nikolaev N.A., Kozachok O.A., Oskina O.V. Adaptive observer of state variables of a nonlinear nonstationary system with unknown constant parameters and delay in the measurement channel. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2023; 23(4): 850–853. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-4-850-853 (In Russ)
11. Anosov V.N., Kaveshnikov V.M., Saidov S.A. Synthesis of a neural power controller in a sensorless traction electric drive system. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021; 2 (176): 31–35. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-31-35. (In Russ)
12. Bernal Miguel, Sala Antonio, Lendek Zsofia, Guerra Thierry-Marie. Analysis and Synthesis of Nonlinear Control Systems: A Convex Optimization Approach. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-90773-0
13. Lovchikov, A.N. Analysis and synthesis of pulse-width systems. A.N. Lovchikov, E.E. Noskova. *Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev*. 2010;4(30):57-61. (In Russ)
14. Aitchanov, B.Kh. Structural synthesis of pulse-frequency control systems with delay. *Proceedings of the University*. 2003; 4: 40-43. (In Russ)
15. Nikitin A.V., Shishlakov V.F. Parametric synthesis of nonlinear automatic control systems: monograph. - SPb: SPbGUAP., 2003:358. (In Russ)
16. Vataeva, E.Yu. Parametric synthesis of a low-power potentiometric tracking system. *Proceedings of MAI*. 2024;134. (In Russ)
17. Vataeva, E.Yu. Parametric synthesis of a low-power potentiometric tracking system with a pulse element. *Information, measuring and control systems*. 2023; 21(4):51-57. (In Russ)

Сведения об авторах:

Никита Леонидович Гречкин, старший преподаватель, кафедра управления в технических системах, space.suai@bk.ru; ORCID ID 0009-0001-8477-0752.

Елизавета Юрьевна Ватаева, кандидат технических наук, доцент, кафедра управления в технических системах, elizavetavataeva@mail.ru; ORCID ID 0000-0002-7007-4967.

Information about authors:

Nikita L. Grechkin, Senior lecturer, Department Control in Technical System», space.suai@bk.ru; ORCID ID 0009-0001-8477-0752.

Elizaveta Yu.Vataeva, Cand.Sci.(Eng.), Assoc. Prof., Department Control in Technical Systems, elizavetavataeva@mail.ru; ORCID ID 0000-0002-7007-4967.

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 30.07.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 16.08.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 25.08.2025.