



**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ/SYSTEM ANALYSIS,
MANAGEMENT AND PROCESSING OF INFORMATION**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4>

EDN: WKNPYA

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Научная статья

Ватаева Е.Ю.^{1,*}, Гречкин Н.Л.²¹ORCID : 0000-0002-7007-4967;²ORCID : 0009-0001-8477-0752;^{1,2} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург,
Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (elizavetavataeva[at]mail.ru)

Предложена: 19.06.2026; Принята: 19.08.2026; Опубликовано: 17.09.2026

Аннотация

Современные системы автоматического управления (САУ) отличаются сложностью, поскольку могут содержать нелинейные элементы, импульсные модуляторы, звенья запаздывания и т.п. Синтез регуляторов для таких систем классическими методами приводит к значительным погрешностям или требует упрощающих допущений, ухудшающих качество переходных процессов. В теории автоматического управления предлагается использовать обобщенный метод Галеркина, который позволяет синтезировать с высокой точностью регуляторы для таких САУ. Однако его практическое применение сопряжено с высокой трудоёмкостью, например, необходимо вручную выполнять аппроксимацию нелинейностей, формировать уравнение невязки и проводить многомерную оптимизацию. Разработанный программный комплекс обеспечивает автоматизированный параметрический синтез систем автоматического управления широкого класса, включая нелинейные, импульсные, многосвязные и содержащие звенья запаздывания.

Ключевые слова: точки переключения, обобщенный метод Галеркина, нелинейные САУ, желаемое программное движение, динамические нелинейности, программный комплекс, оптимизация.

**SOFTWARE PACKAGE FOR THE PARAMETRIC SYNTHESIS OF NON-LINEAR AUTOMATIC CONTROL
SYSTEMS**

Research article

Vataeva E.Y.^{1,*}, Grechkin N.L.²¹ORCID : 0000-0002-7007-4967;²ORCID : 0009-0001-8477-0752;^{1,2} Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (elizavetavataeva[at]mail.ru)

Suggested: 19.06.2026; Accepted: 19.08.2026; Published: 17.09.2026

Abstract

Modern automatic control systems (ACS) are characterised by their complexity, as they may contain non-linear elements, impulse modulators, lagging elements, etc. The synthesis of controllers for such systems using classical methods leads to significant errors or requires simplifying assumptions that degrade the quality of transient processes. In control theory, it is suggested to use the generalised Galerkin method, which allows controllers for such ACSs to be synthesised with high accuracy. However, its practical application is highly labour-intensive; for example, it is necessary to manually approximate non-linearities, formulate the residual equations and carry out multidimensional optimisation. The developed software package provides automated parametric synthesis of a wide class of automatic control systems, including non-linear, impulse-response, multi-link, and systems containing lagging elements.

Keywords: switching points, generalised Galerkin method, non-linear control systems, desired programme motion, dynamic nonlinearities, software package, optimisation.

Введение

Современные системы автоматического управления (САУ) всё чаще включают в себя нелинейные элементы, импульсные модуляторы, звенья запаздывания, и множественные взаимосвязи между входами и выходами [1], [2], [3], [4]. Такие объекты характерны для авиакосмической техники, робототехники, энергетики, химической и металлургической промышленности, где требуется высокая точность и качество переходных процессов при наличии существенных нелинейностей и ограничений [5]. Современные исследования развивают как символьные средства анализа и синтеза нелинейных систем, так и методы управления, учитывающие устойчивость, ограничения и безопасность. В частности, пакет *NLControl* поддерживает задачи моделирования [6], анализа и синтеза непрерывных и дискретных систем, а метод *CLBF-MPC* объединяет предиктивное управление нелинейными объектами с обеспечением ограничений и безопасного поведения системы [7]. В связи с этим актуальной является разработка унифицированного программного комплекса, автоматизирующего основные этапы подготовки и решения задач синтеза нелинейных САУ. Близкие современные разработки также направлены на



автоматизацию выбора и настройки регуляторов для нелинейных объектов [8] и на объединение структурного и параметрического синтеза при наличии задержек и неопределённостей с использованием Matlab/Simulink и генетической оптимизации [9]. Поэтому научно-техническая значимость рассматриваемой работы определяется интеграцией методов аппроксимации и параметрической оптимизации с их программной реализацией, а практическая значимость — сокращением ручных расчётов и созданием единого инструмента для предварительного проектирования сложных нелинейных систем управления.

Предлагаемый программный комплекс учитывает структуру проектируемой системы, нелинейные элементы, импульсные воздействия, запаздывания, многосвязность и несколько искомым параметров; предусматривает кусочно-линейную и полиномиальную аппроксимацию нелинейных характеристик, расчёт интегральных показателей и поиск экстремума целевой функции. В качестве математического аппарата используется обобщённый метод Галеркина. Метод позволяет сводить задачу синтеза к минимизации невязки с использованием аппроксимации нелинейных характеристик, а также задавать желаемое программное движение. Несмотря на разработанную теоретическую базу метода, его практическое применение ограничивается высокой трудоёмкостью аналитических и численных расчётов, особенно при высоком порядке системы, сложной нелинейности, а также подбором программного движения и аппроксимации. Отсутствие универсального программного инструментария, способного автоматизировать весь цикл синтеза — от задания типа системы и желаемого поведения до поиска оптимальных параметров регулятора, — существенно ограничивает распространение подхода в инженерной практике. В данной статье рассматривается описание каждого модуля программного комплекса.

Целью работы является разработка программного комплекса, автоматизирующего процесс параметрического синтеза систем автоматического управления широкого класса на основе обобщённого метода Галёркина.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка модульной архитектуры программного комплекса, охватывающей все этапы синтеза — от выбора типа проектируемой системы до поиска экстремума целевой функции.
2. Формализация алгоритмов выбора и аппроксимации нелинейного элемента.
3. Автоматизация расчёта интегралов A_{qi} , B_{qi} , C_{qi} и формирования уравнения динамики синтезируемой системы.
4. Реализация нескольких методов поиска экстремума целевой функции для обеспечения устойчивости решения к виду нелинейности.
5. Программная реализация комплекса средствами MATLAB/Simulink и верификация полученных результатов на примере типовой технической системы (маломощная следящая система).

Подробная схема обобщенного метода Галеркина описана в работе [10]. С математической точки зрения задача синтеза параметров законов управления сводится к поиску минимума целевой функции, построенной на основе уравнений Галеркина

$$J = \sum_{q=1}^m \left\{ \int_0^\infty \left[\sum_{i=0}^n a_i(c_k) A_{qi} + \sum_{i=0}^u b_i(c_k) B_{qi} - \sum_{i=0}^v e_i(c_k) C_{qi} \right] \right\}^2, \min_{c_k} J \rightarrow 0,$$

где a_i , b_i , e_i — вещественные постоянные коэффициенты полиномов оператора обобщенного дифференцирования D степеней n , u , v , соответственно, являющиеся в общем случае функциями варьируемых параметров c_k закона управления системы; A_{qi} , B_{qi} , C_{qi} — интегралы Галеркина вида

$$\begin{aligned} A_{qi} &= \int_0^\infty D^i \{x^0(t)\} e^{-\rho_q t} dt, i = 0, 1, K, n; \\ B_{qi} &= \int_0^\infty D^i \{F[x^0(t)]\} e^{-\rho_q t} dt, i = 0, 1, K, u; \\ C_{qi} &= \int_0^\infty D^i \{f(t)\} e^{-\rho_q t} dt, i = 0, 1, K, v, \end{aligned}$$

здесь $x^0(t)$ — желаемое программное движение на входе нелинейного элемента; $F[x^0(t)]$ — аппроксимированная полиномом нелинейная характеристика; $f(t)$ — внешнее входное воздействие.

Поиск оптимума целевой функции определяется при технических ограничениях, наложенных на значения варьируемых параметров из условий технической реализуемости (1), ограничениях на абсолютную устойчивость САУ и грубость на заданные вариации искомым параметров закона управления (2).

$$c_k^- \leq c_k \leq c_k^+, k = 1, 2, K, m, \quad (1)$$

где c_k^+ — максимально допустимые значения варьируемых параметров; c_k^- — минимально допустимые значения варьируемых параметров.

$$\Delta = \frac{\delta c_k}{c_k} \leq \Delta^0, \quad (2)$$

где c_k — заданное значение грубости системы; δc_k — вариации параметров, в пределах которых обеспечивается устойчивость системы.

Описание модулей программного комплекса

На рис. 1 представлен общий алгоритм работы программного комплекса. На первом этапе пользователю предлагается выбрать тип проектируемой системы: указать наличие нелинейных элементов и их способ аппроксимации, если они имеются в системе, указать количество входов и выходов, наличие импульсных модуляторов, звеньев запаздывания, количество искомым параметров. На втором этапе пользователю необходимо выбрать вид желаемого программного движения, а на третьем этапе — определить высоту внешнего входного воздействия, заданного в виде ступенчатой функции. На четвертом этапе определяется способ аппроксимации нелинейного элемента. На пятом этапе пользователю необходимо ввести коэффициенты динамики синтезируемой системы и определить ограничения на искомые параметры. На шестом этапе требуется выбрать методику поиска экстремума целевой функции, после чего следует вывод результатов.

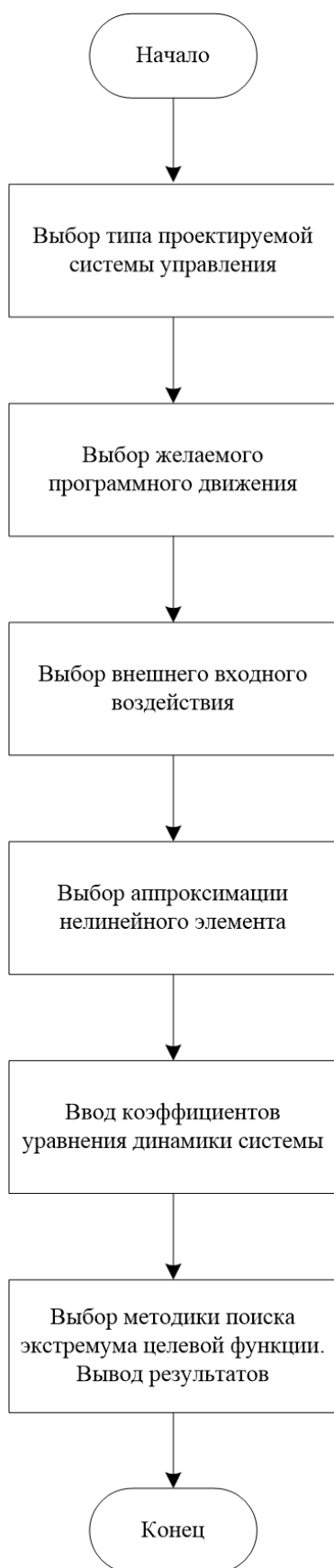


Рисунок 1 - Алгоритм работы программного комплекса
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.1>



Алгоритм модуля «Выбор типа проектируемой системы»

На рис. 2 представлен алгоритм модуля «Выбор типа проектируемой системы» и заключается в следующем:

1. Разработчик должен указать, является ли разрабатываемая система линейной. Если система линейная, то переменной *type_system_flag* присваивается числовое значение 0, после чего выполняется переход к пункту 3. Если система нелинейная, то переменной *type_system_flag* присваивается числовое значение 1, после чего выполняется переход к пункту 2.
2. Разработчик должен указать, какая аппроксимация нелинейного элемента будет использоваться. Если аппроксимация кусочно-линейная, то переменной *approksim_system_flag* присваивается числовое значение 0. Если аппроксимация полиномиальная, то переменной *approksim_system_flag* присваивается числовое значение 1. В случае, если в системе имеется гладкая неоднозначная нелинейность и требуется аппроксимировать процесс на её выходе, переменной *approksim_system_flag* присваивается числовое значение 2. После выполняется переход к пункту 3.
3. Разработчик должен указать, является ли разрабатываемая система импульсной. Если система импульсная, то переменной *impuls_system_flag* присваивается числовое значение 1. В противном случае переменной *impuls_system_flag* присваивается числовое значение 0. После выполняется переход к пункту 4.
4. Разработчик должен указать, является ли разрабатываемая система многосвязной. Если система многосвязная, то переменной *svyaz_system_flag* присваивается числовое значение 1, после чего требуется ввести количество входов и выходов в переменную *nomer_vhod_vihod*, которая является матрицей размером 1x2. Если система односвязная, то переменной *svyaz_system_flag* присваивается числовое значение 0, а в переменную *nomer_vhod_vihod* в первый и второй столбец первой строки записывается числовое значение 1. После выполняется переход к пункту 5.
5. Разработчик должен указать, имеются ли звенья запаздывания в разрабатываемой системе. Если система без звеньев запаздывания, то переменной *zapazd_system_flag* присваивается числовое значение 0. В противном случае переменной *zapazd_system_flag* присваивается числовое значение 1. После выполняется переход к пункту 6.
6. В последнем пункте разработчику необходимо ввести числовое значение, соответствующее количеству неизвестных (искомых) параметров, которое будет записано в переменную *nomerNeizvestnyhparam*. После этого работа модуля завершается.

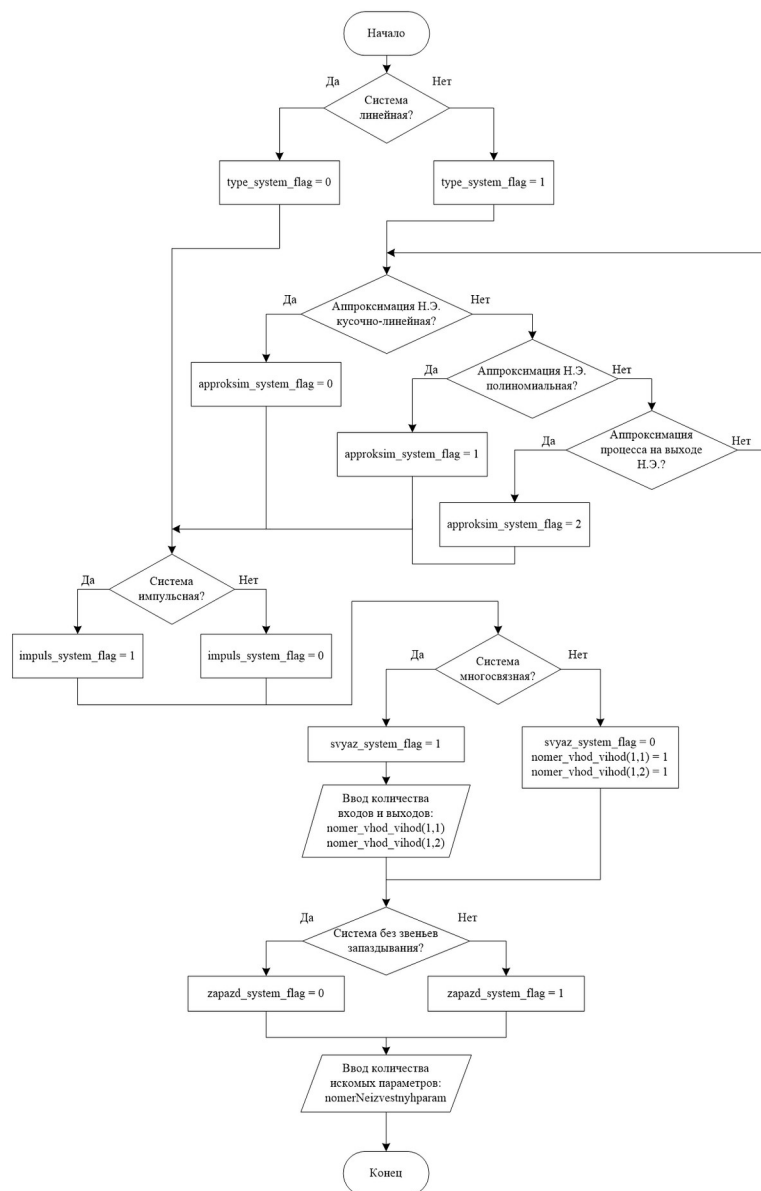


Рисунок 2 - Алгоритм модуля «Выбор типа проектируемой системы»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.2>**Алгоритм модуля «Выбор желаемого программного движения»**

Алгоритм модуля представлен на рис. 3 и заключается в следующем:

1. Разработчику необходимо присвоить номер задаваемому программному движению в виде числового значения, которое будет записано в переменную *nomerAqi*, и определить его вид. После выполнения перехода к пункту 2.

2. Разработчику необходимо указать, имеется ли в программном движении запаздывание. Если есть запаздывание, требуется указать величину времени запаздывания, которая будет записана в переменную *T_zapazd*. После выполнения перехода к пункту 3.

3. Разработчику необходимо указать, является ли программное движение импульсным. Если программное движение импульсное, необходимо выбрать тип модулятора и, в зависимости от его типа, указать период импульсов и коэффициент заполнения ширины импульсов. Их численные значения записываются в переменные *T* и *y_gamma* соответственно. После выполнения перехода к пункту 4.

4. Разработчику необходимо указать численные значения параметров желаемого программного движения, которые записываются в соответствующие переменные, а именно: время переходного процесса $T_{п.п.}$, величина перерегулирования σ , установившееся значение программного движения x_y , начальное значение программного движения x_0 , ширина коридора установившегося значения del_x . После ввода всех параметров выводится график полученного программного движения, а также рассчитываются интегралы A_q и коэффициенты затухания p_q . После выполнения перехода к пункту 5.

5. Если разрабатываемая система является многосвязной, то выполняется переход к пункту 1, в противном случае работа модуля завершается.

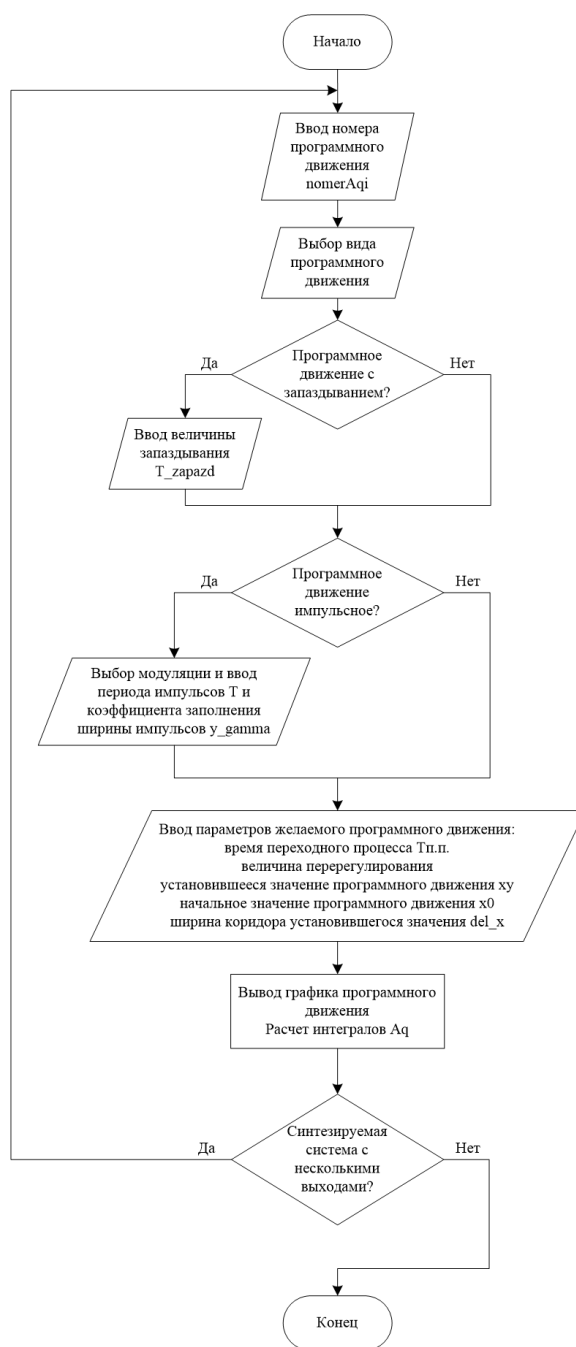


Рисунок 3 - Алгоритм модуля «Выбор желаемого программного движения»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.3>

Полученные переменные, содержащие в себе информацию о желаемых программных движениях, являются глобальными и доступны для чтения в любых последующих модулях программного комплекса. Они необходимы для расчета интегралов C_q и B_q , а также для корректного составления уравнения динамики системы.

Алгоритм модуля «Выбор внешнего входного воздействия»

Алгоритм модуля приведен на рис.4 и заключается в следующем:

1. Разработчику необходимо присвоить номер задаваемому внешнему входному воздействию в виде числового значения, которое будет записано в переменную *номерCqi*. После выполняется переход к пункту 2.
2. Разработчику необходимо указать, имеется ли во входном воздействии запаздывание. Если есть запаздывание, требуется указать величину времени запаздывания, которая будет записана в переменную *T_zapazd*. После выполняется переход к пункту 3.
3. Разработчику необходимо указать, имеется ли во входном воздействии запаздывание. Если есть запаздывание, требуется указать величину времени запаздывания, которая будет записана в переменную *T_zapazd*. После выполняется переход к пункту 4.

4. Разработчику необходимо указать, является ли входное воздействие импульсным. Если входное воздействие импульсное, необходимо выбрать тип модулятора и, в зависимости от его типа, указать период импульсов и коэффициент заполнения ширины импульсов. Их численные значения записываются в переменные T и y_gamma соответственно. После выполняется переход к пункту 5.

1. Разработчику необходимо указать численное значение высоты входного воздействия H , которое записывается в переменную H . После ввода выводится график полученного входного воздействия, а также рассчитываются интегралы C_q с учетом коэффициентов затухания p_q , определенных в алгоритме модуля «Выбор желаемого программного движения». После выполняется переход к пункту 6.

2. Если разрабатываемая система является многосвязной, то выполняется переход к пункту 1, в противном случае работа модуля завершается.

Полученные переменные, содержащие в себе информацию о внешнем входном воздействии, являются глобальными и доступны для чтения в любых последующих модулях программного комплекса. Они необходимы для расчета интегралов C_q , а также для корректного составления уравнения динамики системы.

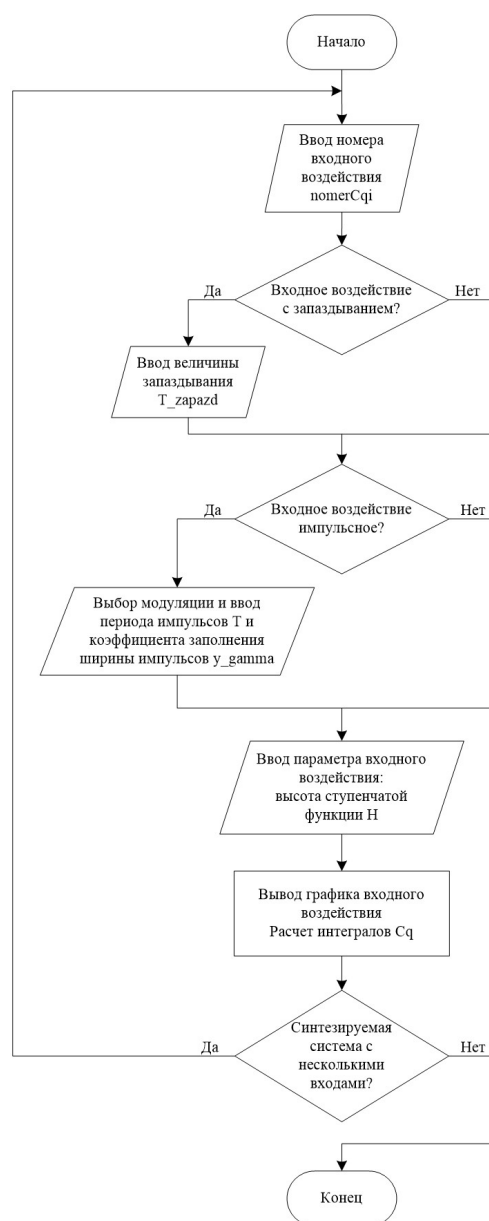


Рисунок 4 - Алгоритм модуля «Выбор внешнего входного воздействия»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.4>

Алгоритм модуля «Выбор аппроксимации нелинейного элемента»

Модуль программного комплекса «Выбор аппроксимации нелинейного элемента» состоит из трех алгоритмов, один из которых, в зависимости от выбора пользователем способа аппроксимации нелинейного элемента, используется в основном алгоритме программы, представленном на рис. 1.

Первый алгоритм, представленный на рис. 5, реализует кусочно-линейную аппроксимацию нелинейного элемента и заключается в следующем:

1. Разработчику необходимо ввести номер желаемого программного движения на входе нелинейного элемента, которое было определено в алгоритме «Выбор желаемого программного движения», в виде числового значения, которое будет записано в переменную *nomerAqi_nelinblock*. После выполняется переход к пункту 2.

2. Разработчику необходимо определиться с общим видом нелинейной характеристики. Если она задается с помощью нескольких параллельно включенных нелинейных элементов, то выполняется переход к пункту 3, в противном случае к пункту 4.

3. Разработчику необходимо ввести числовое значение, равное количеству нелинейных элементов, включённых параллельно. После выполняется переход к пункту 4.

4. Из списка доступных нелинейных элементов, которые были определены в [6] выбирается требуемый. Вводятся параметры нелинейности, после чего выполняется переход к пункту 5.

5. Рассчитываются точки переключения нелинейности в соответствии с программным движением на его входе, после чего вычисляются интегралы B_q . Выполняется переход к пункту 6.

6. Если указаны не все параллельно включенные нелинейные элементы, происходит переход к пункту 4, в противном случае — к пункту 7.

7. Определяется интегралы B_q для суммы параллельно включенных нелинейных элементов. В случае, если был задан один нелинейный элемент, никаких дополнительных расчетов не происходит. Выполняется переход к пункту 8.

8. С учетом всех нелинейных элементов, выводится график полученной нелинейности, а также вид программного движения, которое прошло через нелинейный элемент. После этого работа модуля завершается.

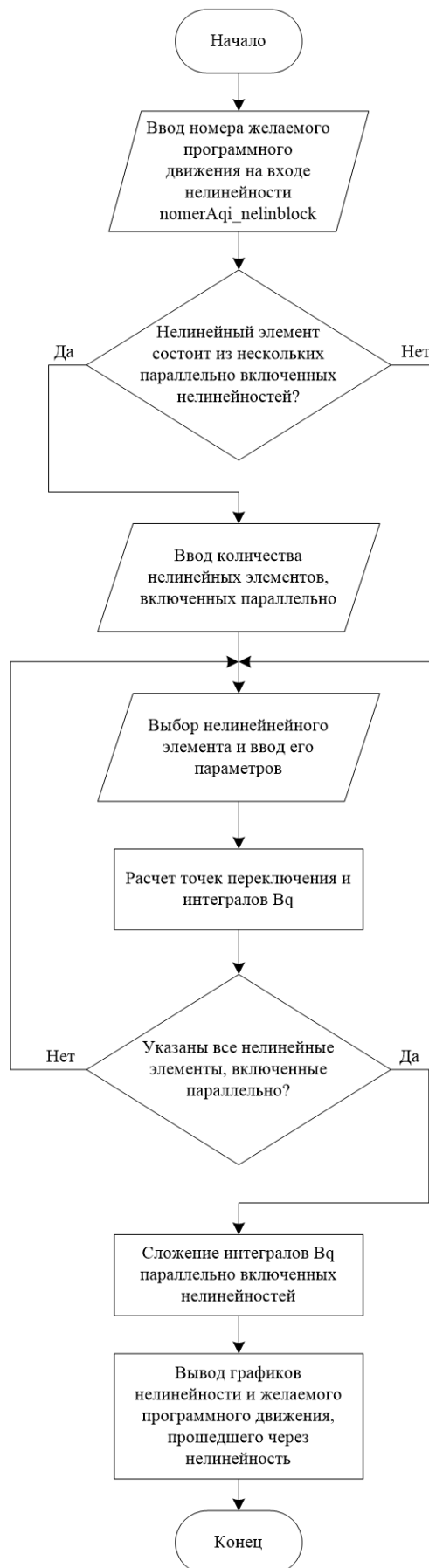


Рисунок 5 - Алгоритм модуля «Кусочно-линейная аппроксимация»
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.5>

Стоит отметить, что для работы программного комплекса также были разработаны алгоритмы для определения точек переключения, которые представлены в [11].

Второй алгоритм, представленный на рис. 6, реализует полиномиальную аппроксимацию нелинейного элемента и заключается в следующем:

1. Разработчику необходимо ввести номер желаемого программного движения на входе нелинейного элемента, которое было определено в алгоритме «Выбор желаемого программного движения», в виде числового значения, которое будет записано в переменную *nomerAqi_nelinblock*. После выполняется переход к пункту 2.
2. Разработчику необходимо ввести коэффициенты аппроксимирующего полинома, с помощью которого будет описываться нелинейная характеристика в синтезируемой системе. После выполняется переход к пункту 3.
3. Определяются интегралы B_q , выводится график полученной нелинейности, а также вид программного движения, которое прошло через нелинейный элемент. После этого работа модуля завершается.

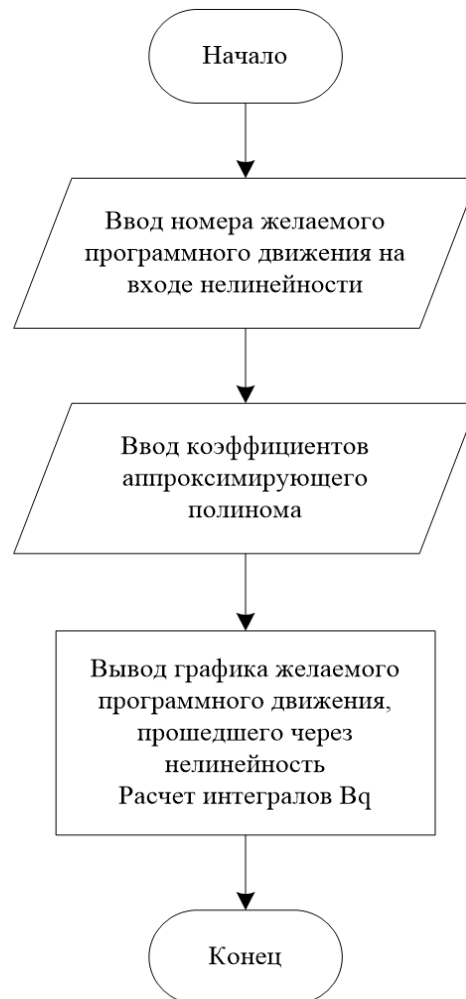


Рисунок 6 - Алгоритм модуля «Полиномиальная аппроксимация»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.6>

Третий алгоритм, представленный на рис. 7, реализует полиномиальную аппроксимацию процесса на выходе нелинейного элемента и заключается в следующем:

1. Разработчику необходимо ввести номер желаемого программного движения на входе нелинейного элемента, которое было определено в алгоритме «Выбор желаемого программного движения», в виде числового значения, которое будет записано в переменную *nomerAqi_nelinblock*. После выполняется переход к пункту 2.
2. Разработчику необходимо ввести коэффициенты аппроксимирующего полинома, с помощью которого будет описываться первый участок процесса на выходе нелинейной характеристики в синтезируемой системе. После выполняется переход к пункту 3.
3. Разработчику необходимо ввести коэффициент прямой, определяющий её высоту по координате ординат, которая будет описывать второй участок процесса на выходе нелинейной характеристики в синтезируемой системе. После выполняется переход к пункту 4.
4. Определяются интегралы B_q , выводится график полученной нелинейности, а также вид программного движения, которое прошло через нелинейный элемент. После этого работа модуля завершается.

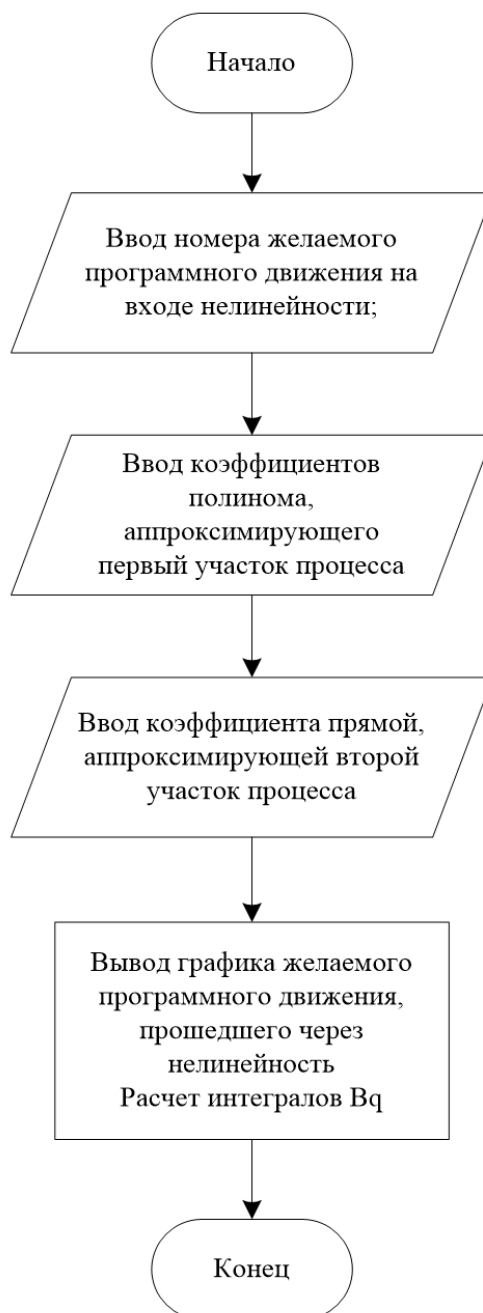


Рисунок 7 - Алгоритм модуля «Полиномиальная аппроксимация процесса»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.7>

Полученные интегралы B_q необходимы для составления уравнения динамики системы. В случае, если система является линейной, модуль «Выбор аппроксимации нелинейного элемента» пропускается.

Алгоритмы модулей «Ввод коэффициентов уравнения динамики системы» и «Выбор методики поиска экстремума целевой функции»

После того, как рассчитаны интегралы A_q , B_q , C_q , необходимо задать уравнение динамики системы. Алгоритм модуля «Ввод коэффициентов уравнения динамики системы» представлен на рис. 8 и заключается в следующем:

1. Разработчику необходимо ввести имена символьных переменных, соответствующих искомым параметрам. Также необходимо определить нижнюю и верхнюю границы поиска параметров. После выполнения перехода к пункту 2.
2. Разработчику необходимо указать номер составляемого уравнения динамики системы. После выполнения перехода к пункту 3.
3. Разработчику необходимо ввести коэффициенты уравнения динамики системы с учетом символьных переменных, соответствующих искомым параметрам. После выполнения перехода к пункту 4.
4. Если система многосвязная, то происходит переход к пункту 2. В противном случае работа модуля завершается.

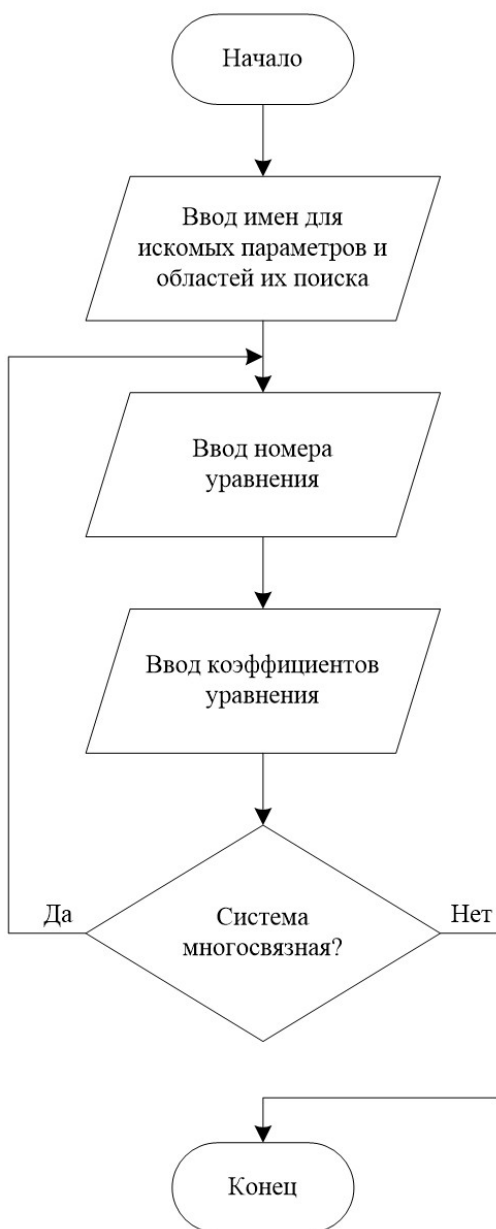


Рисунок 8 - Алгоритм модуля «Ввод коэффициентов уравнения динамики системы»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.8>

После ввода коэффициентов, формируется общее уравнение невязки [12], подлежащее минимизации [13], [14], [15]. Алгоритм модуля «Выбор методики поиска экстремума целевой функции» представлен на рис. 9 и заключается в следующем:

1. Разработчику необходимо выбрать методику поиска экстремума целевой функции [12], [13], [14], [16]. После выполнения перехода к пункту 2.
2. Выводятся результаты поиска, после чего работа модуля завершается.



Рисунок 9 - Алгоритм модуля «Ввод коэффициентов уравнения динамики системы»
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.9>

Программный комплекс реализован в среде MATLAB в виде набора взаимосвязанных *m*-функций и скриптов, объединённых графическим интерфейсом пользователя. Выбор данной среды обусловлен особенностями вычислительной схемы обобщённого метода Галеркина, каждый этап которой обеспечивается штатными средствами MATLAB.

В качестве примера рассмотрим расчет ренальной технической системы — маломощная следящая система (рис.10–11). Требуется найти значения неизвестных параметров T_1 , T_2 которые будут обеспечивать в системе заданные показатели качества ее работы при переходе из одного установившегося состояния в другое, $T_{nn} \approx 2$ с., перерегулирование σ не более 1%.

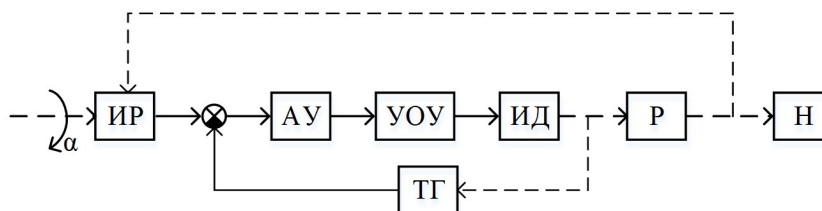


Рисунок 10 - Функциональная схема объекта исследования:
 ИР – измеритель рассогласования; АУ – аналоговый умножитель; УОУ – усилитель обмотки управления; ИД – исполнительный двигатель; Р – редуктор; Н – нагрузка; ТГ – тахогенератор
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.10>

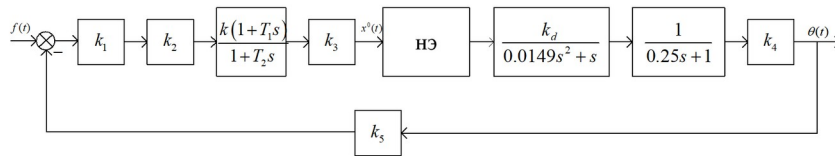


Рисунок 11 - Структурная схема потенциметрической маломощной системы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.11>

Желаемое программное движение имеет вид:

$$x^0(t) = 30,12e^{-2t} \cos(1,53t + 0,9) \quad (3)$$

Динамика системы описывается следующим дифференциальным уравнением

$$x_0(t) \left[(0,0149s^2 + s)(0,25s + 1)(1 + T_2s) \right] + F[x_0(t)] \cdot [k_d k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k (1 + T_1s)] = f(t) [k_1 k_2 k_3 k (1 + T_1s)(0,0149s^2 + s)(0,25s + 1)] \quad (4)$$

Теперь необходимо задать параметры САУ (рис. 12), ввести значения параметров программного движения (рис. 13). Далее определяются параметры внешнего входного воздействия (рис.14) и подбирается вид необходимой аппроксимации (рис.15). В синтезируемой системе в качестве нелинейной характеристики рассматривается нелинейность типа «ограничение». В соответствии с (2) вводятся коэффициенты динамики синтезируемой системы (рис.16).

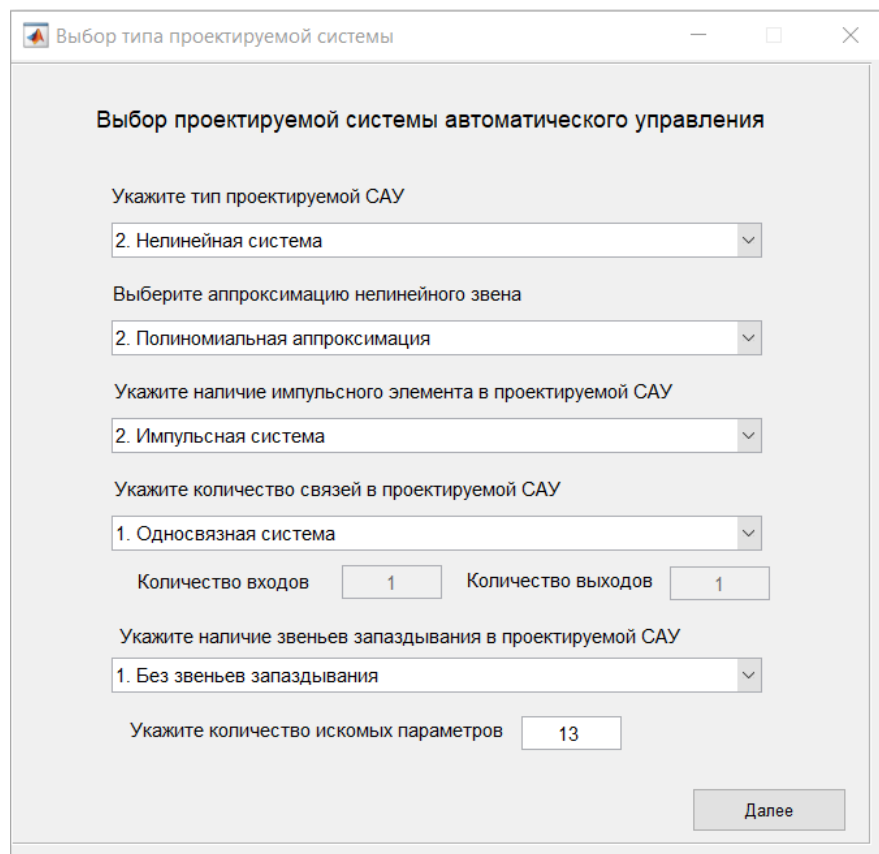


Рисунок 12 - Задание параметров проектируемой системы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.12>

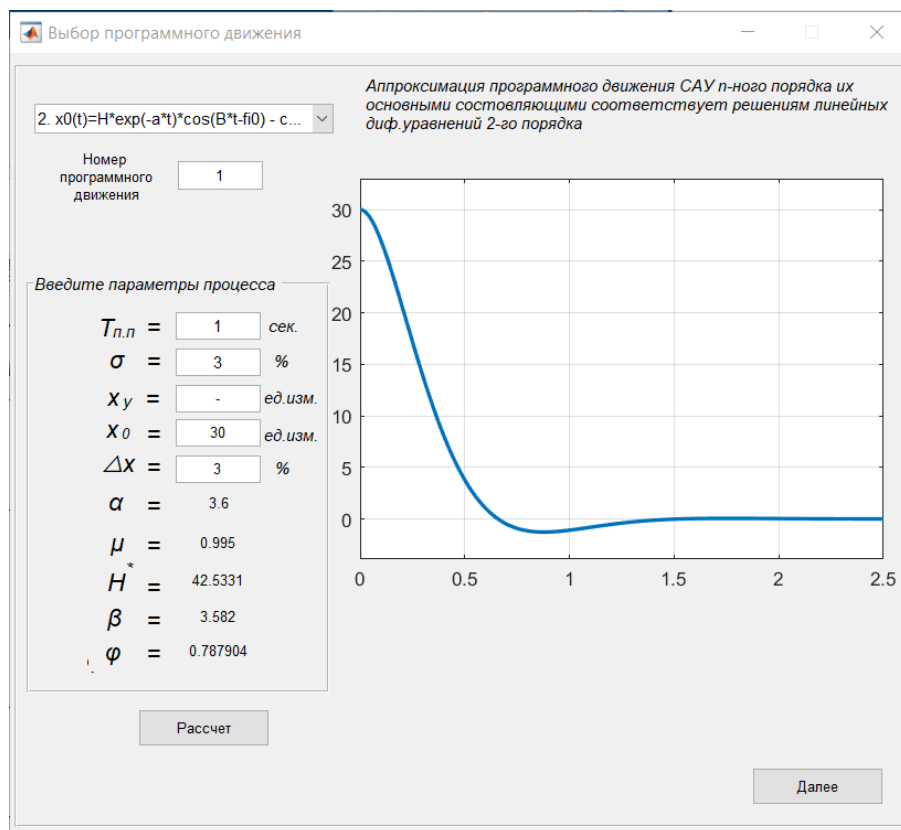


Рисунок 13 - Определение параметров желаемого программного движения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.13>

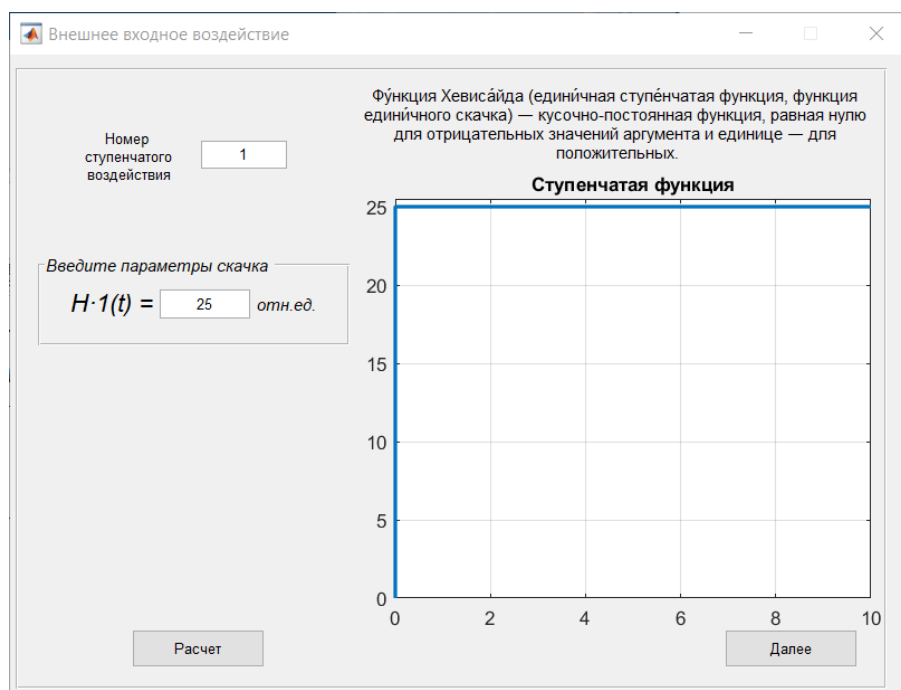


Рисунок 14 - Определение параметров внешнего входного воздействия
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.14>

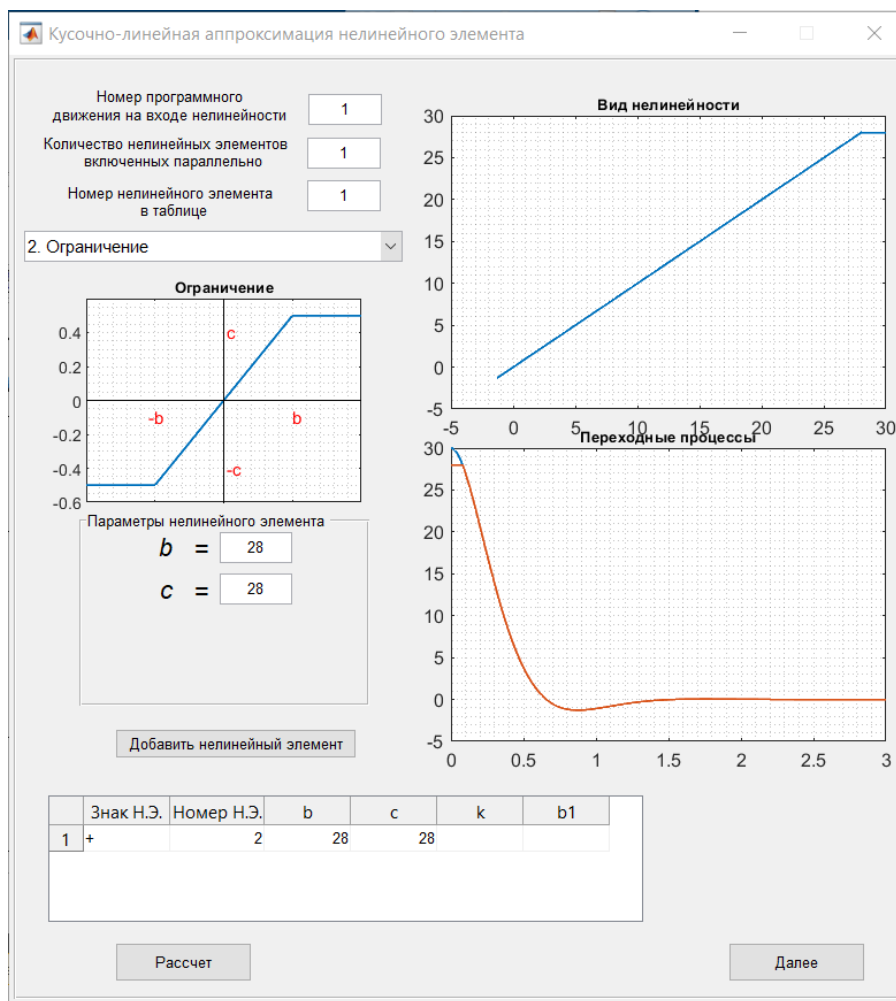


Рисунок 15 - Выбор аппроксимации нелинейного элемента

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.15>

Выбираем методику поиска экстремума целевой функции и программа предоставит ответ (рис.17). В данном программном комплексе возможно использовать четыре метода поиска экстремума целевой функции: метод случайного, поиска метод имитации отжига, метод внутренней точки (стратегия «Глобальный поиск»), метод внутренней точки (стратегия «Мультистарт»).

Уравнение динамики системы

Задайте имя для искомых параметров и укажите область их поиска

Переменная	Нижний предел	Верхний предел
T1	0	10
T2	0	10

Задайте коэффициенты уравнения системы вида
 $Q(ck, D) * x_0(t) + R(ck, D) * F[x_0(t), D\{x_0(t)\}] = S(ck, D) * f(t)$

Коэффициенты уравнения системы

Номер уравнения 1

Выберите порядок $x(t)$ 4

	4	3	2	1	0
$x_1(t)$	0.003725*T2	(0.2649*T...	(T2 + 0.26...	1	0

Выберите порядок $f(t)$ 4

	4	3	2	1	0
$f_1(t)$	0.0044879...	(0.31915*...	(1.2048*T...	(1.2048*T...	0

Выберите порядок $F[x(t)]$ 1

	1	0
$F[x_1(t)]$	2.0892*T2	(2.0892*T...

Сохранить изменения

Далее

Рисунок 16 - Ввод уравнения динамики системы
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.16>

Поиск параметров системы

Методы поиска оптимума целевой функции

1. Метод внутренней точки

	Искомые параметры	Найденные значения
1	T1	9.9981
2	T2	0.747

Решение

Рисунок 17 - Ввод метода поиска экстремума и ответ
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.17>

Таким образом, были получены следующие искомые параметры $T_1 = 9.9981$, $T_2 = 0.747$. Сравним желаемое программное движение и процесс, полученный с синтезированными параметрами (рис.18). Полученные искомые параметры удовлетворяют заданным показателям качества.

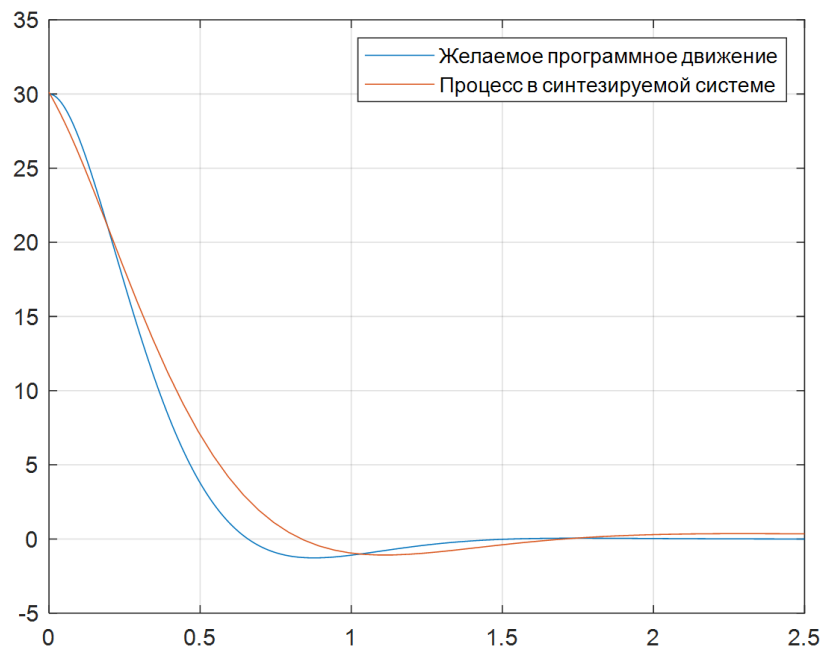


Рисунок 18 - Сравнение желаемого программного движения с движением в синтезированной САУ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.4.18>

Заключение

В работе разработан специализированный программный комплекс блочно-модульной структуры, предназначенный для автоматизации полного цикла параметрического синтеза систем автоматического управления широкого класса. Комплекс обеспечивает решение задач для линейных и нелинейных, импульсных и многосвязных систем, а также систем с запаздыванием, и реализует синтез на основе обобщённого метода Галёркина. Важной особенностью комплекса является автоматизированный выбор и аппроксимация нелинейных элементов, что позволяет учитывать до N типовых нелинейностей и адаптировать процедуру расчёта к структуре проектируемой системы.

В составе комплекса реализованы автоматический расчёт интегралов Галёркина A_{qi} , B_{qi} и C_{qi} , а также формирование обобщённого уравнения динамики синтезируемой системы с учётом варьируемых параметров регулятора. Пользователю предоставляется возможность выбора одного из четырёх методов поиска экстремума целевой функции, что позволяет учитывать особенности различных видов нелинейностей, ограничения на параметры и требования к качеству переходного процесса. Модульная архитектура комплекса обеспечивает возможность расширения библиотеки нелинейных характеристик и методов оптимизации без изменения его основного вычислительного ядра.

Работоспособность разработанного комплекса подтверждена на примере синтеза маломощной следящей системы. Полученные значения искомых параметров $T_1=9.9981$ и $T_2=0.747$ обеспечили показатели качества переходного процесса, соответствующие заданным требованиям. Научная новизна работы заключается в объединении в рамках единого программного комплекса процедур синтеза для качественно различных классов систем, автоматизации формирования интегралов обобщённого метода Галёркина, а также в применении модульной архитектуры и встроенного графического интерфейса, обеспечивающего визуализацию промежуточных результатов на каждом этапе синтеза.

**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».

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, under agreement No. FSRF-2023-0003, "Fundamental Principles for the Design of Interference-Resistant Systems for Space and Satellite Communications, Relative Navigation, Computer Vision and Aerospace Monitoring".

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Bakhtadze N. Industrial digital ecosystems: Predictive models and architecture development issues / N. Bakhtadze, A. Suleykin // *Annual Reviews in Control.* — 2021. — 51. — P. 56–64. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578820300766> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1016/j.arcontrol.2020.11.001
2. Нгуен Х.Т Синтез адаптивного наблюдателя для нелинейных нестационарных систем / Х.Т Нгуен, С.М. Власов, А.А. Пыркин и др. // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* — 2024. — 24. — С. 554–562. — URL: https://ntv.ifmo.ru/en/article/22924/sintez_adaptivnogo_nablyudatelya_dlya_nelineynyh_nestacionarnyh_sistem.htm (дата обращения: 15.06.26). — DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-554-562
3. Gao J. A weighted switching sequence optimization algorithm for static output feedback control synthesis of nonlinear systems / J. Gao, H. Xie // *Applied Mathematics and Computation.* — 2025. — 489. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0096300324006131> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1016/j.amc.2024.129152
4. Пыркин А.А. Управление по выходу для класса нелинейных систем на основе динамической линеаризации / А.А. Пыркин, М.Ш. Та, К.К. Нгуен и др. // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.* — 2024. — 2. — С. 208–213. — DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-208-213
5. Рысин А.В. Использование математических моделей элементов воздушных линий электропередачи для диагностики оборудования / А.В. Рысин // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* — 2025. — 6. — С. 557–561. — URL: <https://pribor.ifmo.ru/jour/article/view/387> — DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-557-561
6. Kotta Ü. A Mathematica Package for Nonlinear Control Systems / Ü. Kotta, M. Tönso // *IFAC-PapersOnLine.* — 2017. — 50. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317301581> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.122
7. Wu Zh. Control Lyapunov-Barrier Function-Based Model Predictive Control of Nonlinear Systems / Zh. Wu, F. Albalawi, Zh. Zhang [et al.] // *Automatica.* — 2019. — 109. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109819303693?via%3Dihub> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1016/j.automatica.2019.108508
8. Yang L. Research on Application of Fuzzy Control Algorithm in Nonlinear System / L. Yang // *Proceedings of the 4th International Conference on Machinery, Materials and Information Technology Applications (ICMMITA 2016).* — Atlantis Press, 2016. — URL: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/icmmita-16/25868114> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.2991/icmmita-16.2016.143
9. Shelenok E. Simulation Complex of Adaptive-Robust Control Systems for Multi-Mode Plants with Delay / E. Shelenok, S. Smirnova // *2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing.* — New York: IEEE, 2024. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/iel8/10553372/10553656/10553993.pdf> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1109/ICIEAM61614.2024.10553993
10. Никитин А.В. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления / А.В. Никитин, В.Ф. Шишлаков. — Санкт-Петербург: ГУАП, 2003. — 353 с.
11. Гречкин Н.Л. Алгоритм вычисления точек переключения нелинейности “трехпозиционное реле с гистерезисом” / Н.Л. Гречкин, Е.Ю. Вагаева, В.Ф. Шишлаков // *Датчики и Системы.* — 2025. — 4. — С. 49–55. — URL: <https://sensors-and-systems.ru/issues/284> (дата обращения: 15.06.26). — DOI: 10.24412/1992-7185-2025-4-49-55
12. Вагаева Е.Ю. Параметрический синтез потенциометрической маломощной следящей системы с импульсным элементом / Е.Ю. Вагаева // *Информационно-измерительные и управляющие системы.* — 2023. — 4. — URL: http://radiotec.ru/ru/journal/Information-measuring_and_Control_Systems/number/2023-4/article/23816 (дата обращения: 15.06.26). — DOI: 10.18127/j20700814-202304-07
13. Вараюнь М.И. Метод случайного поиска при оценке параметров сигнала эмиссионной системы / М.И. Вараюнь, Е.М. Виноградова, А.Ю. Антонов // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления.* — 2021. — 3. — С. 228–239. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod->



sluchaynogo-poiska-pri-otsenke-parametrov-signala-emissionnoy-sistemy/viewer (дата обращения: 15.06.26). — DOI: 10.21638/11701/spbu10.2021.301

14. Карпов П.М. Новый режим охлаждения в алгоритме симуляции отжига / П.М. Карпов // Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2016. — 1. — С. 28–34. — URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/analiz/2016/01/2016-01-04.pdf> (дата обращения: 15.06.26).

15. Ачкасов Д.А. Изучение и моделирование эвристических алгоритмов оптимизации / Д.А. Ачкасов, К.В. Зольников, Н.Н. Литвинов // Моделирование систем и процессов. — 2025. — 1. — С. 17–28. — URL: <https://journal.vgtu.ru/archive-of-numbers/2025-1> (дата обращения: 15.06.26). — DOI: 10.12737/2219-0767-2025-17-28

16. Стрекаловский А.С. Минимизирующие последовательности в задаче ДС оптимизации с ограничениями / А.С. Стрекаловский // Труды института математики и механики УрО РАН. — 2023. — 3. — С. 185–209. — URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnl=timmm&paperid=2026&option_lang=rus (дата обращения: 15.06.26). — DOI: 10.1134/S0081543823060214

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bakhtadze N. Industrial digital ecosystems: Predictive models and architecture development issues / N. Bakhtadze, A. Suleykin // Annual Reviews in Control. — 2021. — 51. — P. 56–64. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578820300766> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1016/j.arcontrol.2020.11.001

2. Nguen X.T. Sintez adaptivnogo nablyudatelya dlya nelinejnyx nestacionarnyx sistem [Synthesis of adaptive observer for nonlinear nonstationary systems] / X.T. Nguen, S.M. Vlasov, A.A. Pyrkin et al. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. — 2024. — 24. — P. 554–562. — URL: https://ntv.ifmo.ru/en/article/22924/sintez_adaptivnogo_nablyudatelya_dlya_nelineynyh_nestacionarnyx_sistem.htm (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-4-554-562 [in Russian]

3. Gao J. A weighted switching sequence optimization algorithm for static output feedback control synthesis of nonlinear systems / J. Gao, H. Xie // Applied Mathematics and Computation. — 2025. — 489. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0096300324006131> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1016/j.amc.2024.129152

4. Pirkin A.A. Upravlenie po vikhodu dlya klassa nelinejnykh sistem na osnove dinamicheskoi linearizatsii [Output control for a class of nonlinear systems based on dynamic linearization] / A.A. Pirkin, M.Sh. Ta, K.K. Nguen et al. // Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. — 2024. — 2. — P. 208–213. — DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-208-213 [in Russian]

5. Risin A.V. Ispolzovanie matematicheskikh modelei elementov vozdukhnykh linii elektroperedachi dlya diagnostiki oborudovaniya [The Use of Mathematical Models of Overhead Power Transmission Line Elements for Equipment] / A.V. Risin // Известия высших учебных заведений. Приборостроение [Proceedings of Universities. Journal of Instrument Engineering]. — 2025. — 6. — P. 557–561. — URL: <https://pribor.ifmo.ru/jour/article/view/387> — DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-557-561 [in Russian]

6. Kotta Ü. A Mathematica Package for Nonlinear Control Systems / Ü. Kotta, M. Tönso // IFAC-PapersOnLine. — 2017. — 50. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317301581> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.122

7. Wu Zh. Control Lyapunov-Barrier Function-Based Model Predictive Control of Nonlinear Systems / Zh. Wu, F. Albalawi, Zh. Zhang [et al.] // Automatica. — 2019. — 109. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109819303693?via%3Dihub> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1016/j.automatica.2019.108508

8. Yang L. Research on Application of Fuzzy Control Algorithm in Nonlinear System / L. Yang // Proceedings of the 4th International Conference on Machinery, Materials and Information Technology Applications (ICMMITA 2016). — Atlantis Press, 2016. — URL: <https://www.atlantispress.com/proceedings/icmmita-16/25868114> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.2991/icmmita-16.2016.143

9. Shelenok E. Simulation Complex of Adaptive-Robust Control Systems for Multi-Mode Plants with Delay / E. Shelenok, S. Smirnova // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. — New York: IEEE, 2024. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/iel8/10553372/10553656/10553993.pdf> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1109/ICIEAM61614.2024.10553993

10. Nikitin A.V. Parametricheskij sintez nelinejnyx sistem avtomaticheskogo upravleniya [Parametric synthesis of nonlinear automatic control systems] / A.V. Nikitin, V.F. Shishlakov. — Saint Petersburg: GUAP, 2003. — 353 p. [in Russian]

11. Grechkin N.L. Algoritmy vy'chisleniya tochek pereklyucheniya nelinejnosti "trepozicionnoe rele s gisterezisom" [Algorithm for calculating nonlinearity switching points "three-position relay with hysteresis"] / N.L. Grechkin, E.Yu. Vataeva, V.F. Shishlakov // Sensors and systems. — 2025. — 4. — P. 49–55. — URL: <https://sensors-and-systems.ru/issues/284> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.24412/1992-7185-2025-4-49-55 [in Russian]

12. Vataeva E.Yu. Parametricheskij sintez potentsiometricheskoi malomoshhnoj sledyashhej sistemy s impul'snym elementom [Parametric synthesis of a potentiometric low-power tracking system with an impulse element] / E.Yu. Vataeva // Information-measuring and Control Systems. — 2023. — 4. — URL: http://radiotec.ru/journal/Information-measuring_and_Control_Systems/number/2023-4/article/23816 (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.18127/j20700814-202304-07 [in Russian]



13. Varayun' M.I. Metod sluchajnego poiska pri ocenke parametrov signala e'missionnoj sistemy' [Random search method for estimating the parameters of the emission system signal] / M.I. Varayun', E.M. Vinogradova, A.Yu. Antonov // Bulletin of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes. — 2021. — 3. — P. 228–239. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-sluchaynogo-poiska-pri-otsenke-parametrov-signala-emissionnoj-sistemy/viewer> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.21638/11701/spbu10.2021.301 [in Russian]
14. Karpov P.M. Novii rezhim okhlazhdeniya v algoritme simulyatsii otzhiga [Novel simulated annealing cooling schedule] / P.M. Karpov // Vestnik VGU, Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii [Bulletin of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies]. — 2016. — 1. — P. 28–34. — URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/analiz/2016/01/2016-01-04.pdf> (accessed: 15.06.26). [in Russian]
15. Achkasov D.A. Izuchenie i modelirovanie e'vrsticheskix algoritmov optimizatsii [Study and modeling of heuristic optimization algorithms] / D.A. Achkasov, K.V. Zol'nikov, N.N. Litvinov // Modeling of systems and processes. — 2025. — 1. — P. 17–28. — URL: <https://journal.vglu.ru/archive-of-numbers/2025-1> (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.12737/2219-0767-2025-17-28 [in Russian]
16. Strekalovskij A.S. Minimiziruyushhie posledovatel'nosti v zadache DC optimizatsii s ogranicheniyami [Minimizing Sequences in a Constrained DC Optimization Problem] / A.S. Strekalovskij // Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. — 2023. — 3. — P. 185–209. — URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jmid=tim&paperid=2026&option_lang=rus (accessed: 15.06.26). — DOI: 10.1134/S0081543823060214 [in Russian]