

DOI 10.37882/2223-2966.2026.03.08

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА И ЕГО ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА PYTHON

ALGORITHM FOR OPTIMIZING PID CONTROLLER PARAMETERS AND ITS PYTHON SOFTWARE IMPLEMENTATION

**M. Zhuravleva
M. Samokhin**

Summary. This paper addresses the problem of automatic optimization of PID controller parameters for automatic control systems with a second-order aperiodic plant. An algorithm for tuning the controller gains is proposed, based on the minimization of an extended integral performance index that accounts for the control error, overshoot, settling time, and control effort. The optimization procedure is implemented as a multi-stage grid search with adaptive narrowing of parameter ranges and rejection of unstable solutions. A software application with a graphical user interface has been developed, providing interactive configuration of the plant parameters, optimization settings, and visualization of simulation results. The effectiveness of the proposed approach is confirmed by time-domain simulations under a unit step input, demonstrating a significant improvement in the dynamic performance of the control system compared to a baseline PID tuning.

Keywords: PID controller, parameter optimization, integral performance index, second-order aperiodic plant, multi-stage grid search, time-domain simulation, software implementation, graphical user interface, automatic control systems.

Журавлева Марина Олеговна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва
marina_030405@mail.ru

Самохин Михаил Николаевич

лаборант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва
miklesamoxin@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача автоматической оптимизации параметров ПИД-регулятора для систем автоматического управления с аperiodическим объектом второго порядка. Предложен алгоритм подбора коэффициентов регулятора, основанный на минимизации расширенного интегрального критерия качества, учитывающего ошибку регулирования, перерегулирование, время установления и энергию управляющего воздействия. Алгоритм реализован в виде многостадийного сеточного поиска с адаптивным сужением диапазонов параметров и отбраковкой неустойчивых решений. Разработан программный комплекс с графическим пользовательским интерфейсом, обеспечивающий интерактивную настройку параметров моделирования, алгоритма оптимизации и визуализацию результатов. Эффективность предложенного подхода подтверждена результатами математического моделирования при ступенчатом воздействии, демонстрирующими существенное улучшение динамических характеристик системы управления по сравнению с базовой настройкой ПИД-регулятора.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, оптимизация параметров, интегральный критерий качества, аperiodический объект второго порядка, многостадийный сеточный поиск, математическое моделирование, программная реализация, пользовательский интерфейс, системы автоматического управления.

ПИД-регуляторы широко применяются в системах автоматического управления благодаря простоте, универсальности и устойчивой практике промышленного использования [1-4]. Однако качество управления существенно зависит от выбора коэффициентов K_p, K_i, K_d [5,6]. Ручная настройка и эмпирические методы (например, метод Зиглера–Николса) не всегда обеспечивают требуемые показатели переходного процесса, особенно при наличии ограничений на управляющее воздействие и требований к быстродействию [5,12,13].

В инженерной практике возрастает потребность в программных инструментах, которые позволяют воспроизводимо и наглядно выполнять настройку параметров ПИД-регулятора на этапе проектирования без обязательного привлечения физического стенда [1,4]. Такой

подход сокращает время подбора параметров, уменьшает субъективность настройки и позволяет проводить серию вычислительных экспериментов при варьировании параметров объекта управления.

Целью работы является разработка и исследование алгоритма оптимизации параметров ПИД-регулятора для аperiodического объекта второго порядка, а также создание программного приложения с графическим интерфейсом для задания параметров моделирования, запуска оптимизации и анализа результатов.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Построить математическую модель объекта управления и замкнутой системы с ПИД-регулятором.

2. Сформировать критерий качества и ограничения, отражающие требования к переходному процессу.
3. Разработать и реализовать алгоритм оптимизации параметров K_p, K_i, K_d .
4. Разработать пользовательский интерфейс приложения для настройки параметров и визуализации результатов.
5. Провести вычислительный эксперимент и сравнить базовую и оптимизированную настройки по метрикам качества.

Практическая значимость работы заключается в создании программного инструмента, позволяющего выполнять настройку и анализ ПИД-регулятора в интерактивном режиме, что может использоваться как в учебных задачах, так и на этапе предварительной настройки систем управления.

В рамках настоящей работы исследуется замкнутая система автоматического управления, включающая аperiodический объект второго порядка и ПИД-регулятор. Математическое моделирование используется в качестве основного инструмента анализа, поскольку оно позволяет исследовать динамические свойства системы, варьировать параметры и оценивать влияние алгоритма оптимизации без использования физического оборудования.

В качестве объекта управления выбран типовой аperiodический объект второго порядка, широко применяемый при анализе систем автоматического управления и адекватно описывающий динамику реальных технологических процессов [7,9]. Передаточная функция объекта имеет вид:

$$W(s) = \frac{1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad (1)$$

где T_1 и T_2 — постоянные времени объекта управления.

Выбор данной модели обусловлен её универсальностью и тем, что она позволяет исследовать влияние параметров регулятора на быстродействие и устойчивость системы без усложнения математического описания. При этом объект второго порядка является более информативным по сравнению с объектами первого порядка, поскольку позволяет анализировать форму переходного процесса и характер изменения ошибки регулирования.

В программном приложении предусмотрена возможность изменения параметров T_1 и T_2 , а также шага дискретизации по времени. Настройка данных параметров осуществляется через элементы пользовательского интерфейса, что позволяет оперативно исследовать влияние параметров объекта на динамику системы.

Показан процесс задания постоянных времени объекта и шага дискретизации с использованием ползунков и числовых полей.

Управление объектом осуществляется с помощью ПИД-регулятора, формирующего управляющее воздействие на основе ошибки регулирования. Ошибка определяется как разность между заданием и текущим выходом системы:

$$e(t) = r(t) - y(t), \quad (2)$$

где $r(t)$ — задающее воздействие, $y(t)$ — выход объекта управления.

Непрерывный закон управления ПИД-регулятора имеет следующий вид:

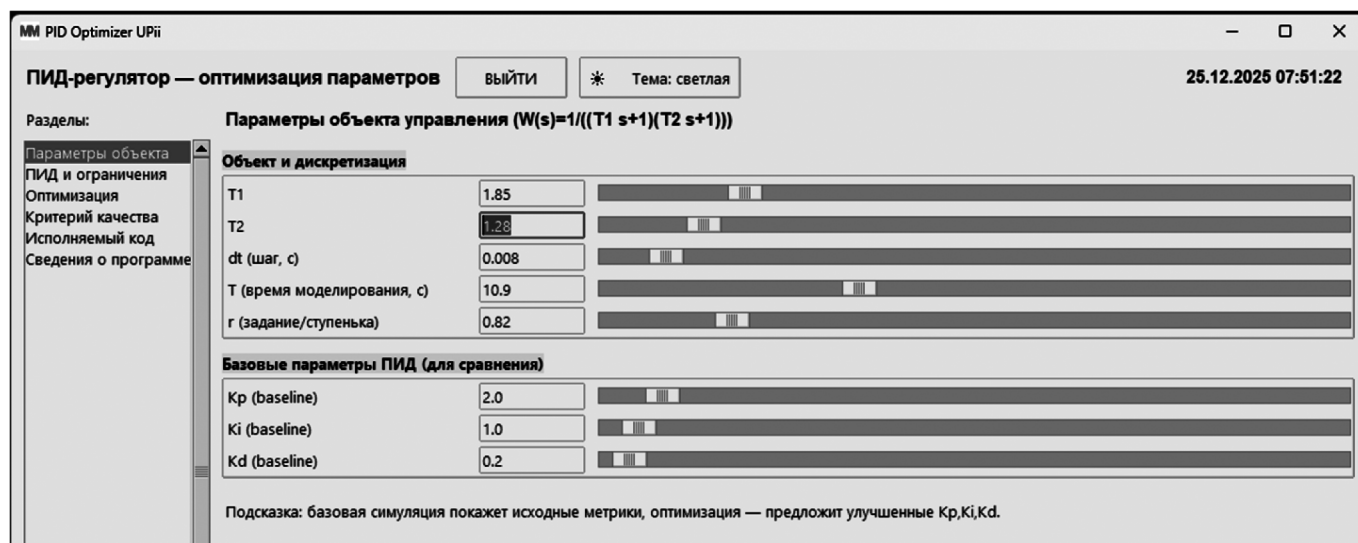


Рис. 1. Изменение параметров объекта и дискретизации на главном экране

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3)$$

где K_p, K_i, K_d — коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно [5,6].

Пропорциональная составляющая обеспечивает формирование управляющего воздействия, пропорционального текущей ошибке, интегральная — устраняет статическую ошибку, а дифференциальная — повышает быстродействие системы за счёт учёта скорости изменения ошибки.

Поскольку моделирование и оптимизация выполняются в цифровой вычислительной среде, ПИД-регулятор реализуется в дискретной форме с шагом дискретизации Δt . Интегральная составляющая аппроксимируется методом прямоугольников, а дифференциальная — с использованием фильтра первой степени, что позволяет снизить влияние высокочастотных помех.

Кроме того, в программной реализации используются следующие дополнительные механизмы:

- ограничение управляющего воздействия $u(t)$;
- anti-windup интегратора при достижении насыщения;
- контроль предельных значений выхода и управляющего сигнала для выявления неустойчивых режимов.

Настройка указанных параметров осуществляется в разделе интерфейса «ПИД и ограничения».

В интерфейсе задаются пределы управляющего воздействия, параметры фильтра производной и режим anti-windup.

Использование данных механизмов позволяет повысить устойчивость численного моделирования и приближает поведение регулятора к условиям реальной эксплуатации в автоматизированных системах управления.

После задания математической модели замкнутой системы управления возникает задача выбора таких параметров ПИД-регулятора, при которых обеспечивается требуемое качество переходного процесса. В рамках данной работы настройка параметров регулятора рассматривается как задача оптимизации по заданному критерию качества, формируемому на основе динамических характеристик системы.

Оптимизации подлежат коэффициенты ПИД-регулятора, образующие вектор параметров:

$$\theta = (K_p, K_i, K_d). \quad (4)$$

Поиск оптимального решения осуществляется в заданных диапазонах изменения параметров, которые

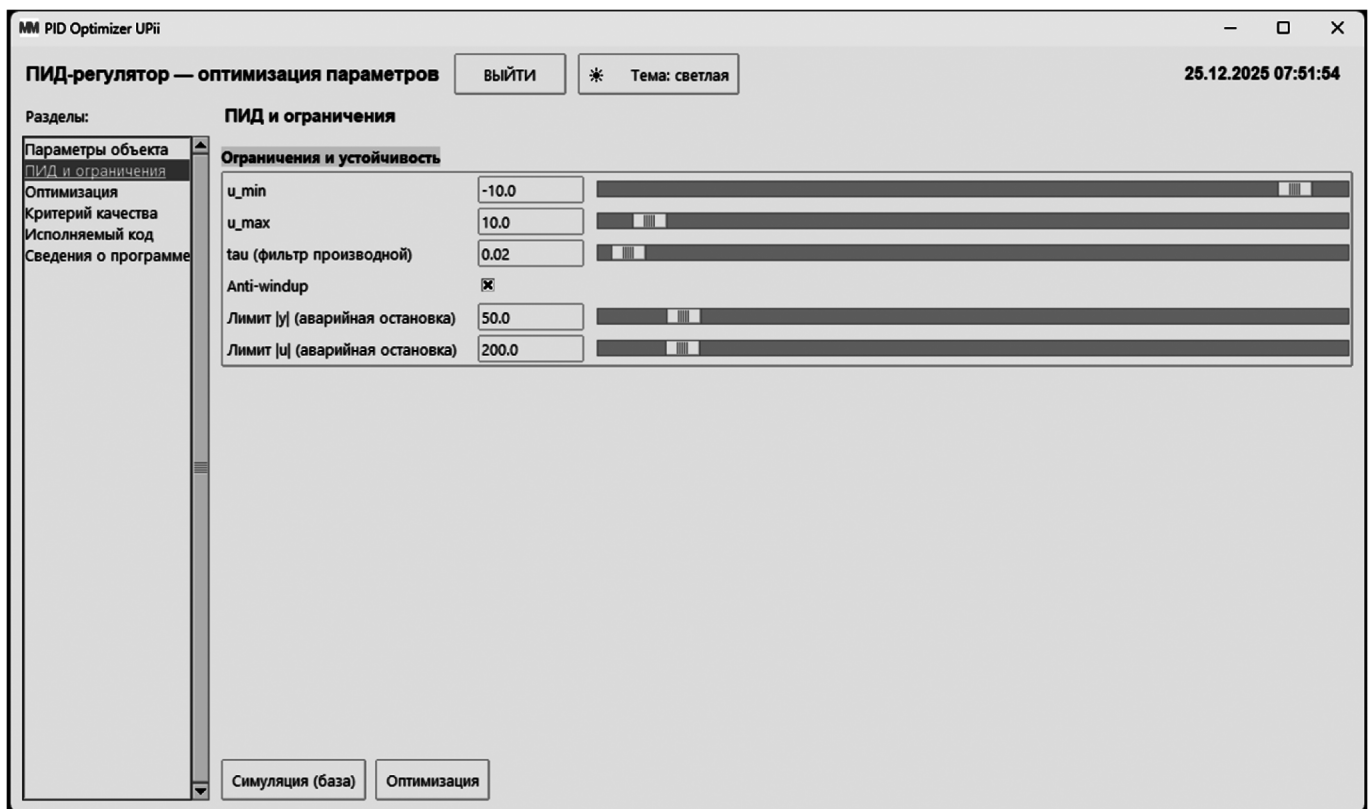


Рис. 2. Раздел «ПИД и ограничения»: параметры ограничений и проверки устойчивости

выбираются исходя из требований устойчивости системы и практической реализуемости регулятора. Ограничение диапазонов позволяет сократить область поиска и исключить заведомо некорректные режимы.

Кроме того, в процессе оптимизации вводятся дополнительные ограничения:

- ограничение управляющего воздействия;
- контроль предельных значений выхода системы;
- отбраковка неустойчивых решений, при которых наблюдается неограниченный рост выходного сигнала или управляющего воздействия.

Наличие указанных ограничений обеспечивает корректность вычислительного эксперимента и предотвращает искажение результатов оптимизации.

В качестве базового показателя качества управления используется интегральный квадрат ошибки регулирования (ISE), широко применяемый при анализе и синтезе систем автоматического управления. Данный критерий имеет вид:

$$J_{ISE} = \int_0^T e^2(t) dt, \quad (5)$$

где $e(t)$ — ошибка регулирования, T — время моделирования.

Минимизация данного функционала способствует снижению средней квадратичной ошибки за весь интервал переходного процесса [1,4,10]. Однако использование только критерия (5) не позволяет в полной мере учесть требования к перерегулированию, быстродействию и величине управляющего воздействия.

Для более полного учёта характеристик переходного процесса в работе используется расширенный критерий качества, включающий штрафные слагаемые. Общий вид критерия оптимизации имеет следующий вид:

$$J = \int_0^T e^2(t) dt + \alpha P_{OS} + \beta P_{TS} + \gamma \int_0^T u^2(t) dt, \quad (6)$$

где:

- P_{OS} — штраф за перерегулирование;
- P_{TS} — штраф за превышение допустимого времени установления;
- α, β, γ — весовые коэффициенты, определяющие вклад соответствующих слагаемых в общий критерий.

Штраф за перерегулирование формируется при превышении заданного допустимого уровня, а штраф за время установления — при превышении целевого значения времени выхода системы в установившийся режим. Последнее слагаемое учитывает энергию управляющего воздействия и позволяет ограничить чрезмерно резкие управляющие сигналы.

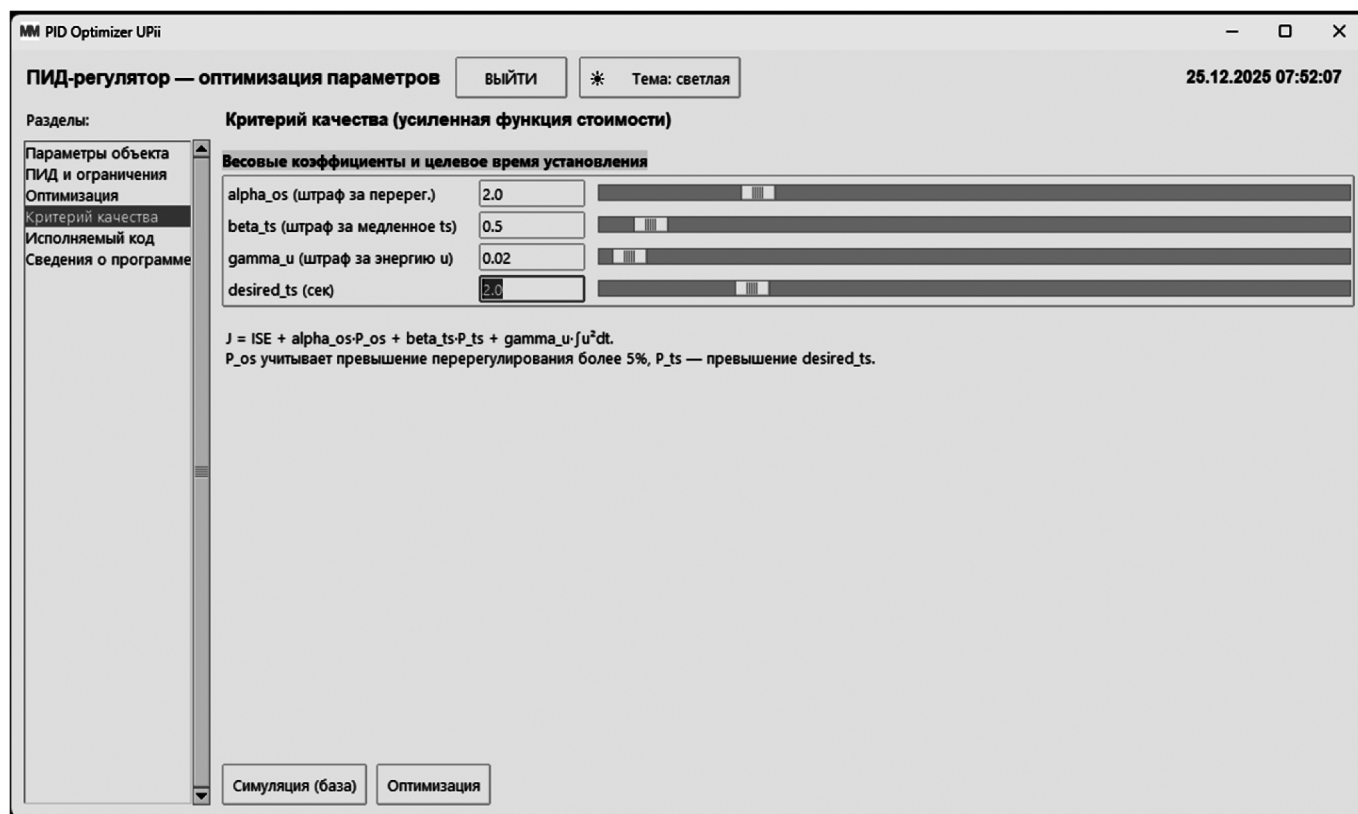


Рис. 3. Раздел «Критерий качества»: изменение параметров функции стоимости

Таким образом, критерий (6) обеспечивает компромисс между точностью, быстродействием и плавностью управления [5,12].

Для повышения гибкости алгоритма оптимизации в программном приложении реализована возможность интерактивной настройки параметров критерия качества. В разделе «Критерий качества» пользователь может изменять весовые коэффициенты штрафных слагаемых, а также задавать целевое время установления.

Показана настройка весовых коэффициентов штрафов и целевого времени установления.

Дополнительно предусмотрена расширенная форма настройки критерия, позволяющая более точно адаптировать функцию стоимости под требования к переходному процессу.

Интерфейс позволяет формировать критерий оптимизации в зависимости от приоритетов задачи управления.

Интерактивное задание параметров критерия делает процесс оптимизации наглядным и позволяет исследовать влияние различных весов штрафных слагаемых на результаты настройки регулятора.

Таким образом, задача оптимизации параметров ПИД-регулятора сведена к задаче минимизации расши-

ренного интегрального критерия качества при наличии ограничений и условий устойчивости. На основе сформулированной постановки далее разрабатывается алгоритм оптимизации, обеспечивающий автоматический подбор параметров регулятора.

После формулировки задачи оптимизации и задания критерия качества возникает необходимость разработки алгоритма, обеспечивающего автоматический подбор параметров ПИД-регулятора в заданных диапазонах с учётом ограничений и требований устойчивости. В рамках данной работы выбран алгоритм поисковой оптимизации, ориентированный на воспроизводимость результатов, наглядность и простоту программной реализации.

Оптимизация параметров ПИД-регулятора рассматривается как задача поиска минимума целевой функции качества J , определённой выражением (6), в пространстве параметров (K_p, K_i, K_d) . Для решения данной задачи используется многостадийный сеточный поиск с адаптивным сужением диапазонов [5,12,13].

На первой стадии алгоритма параметры регулятора перебираются на грубой сетке в заранее заданных диапазонах. Для каждой комбинации параметров выполняется моделирование замкнутой системы управления, после чего вычисляется значение критерия качества.

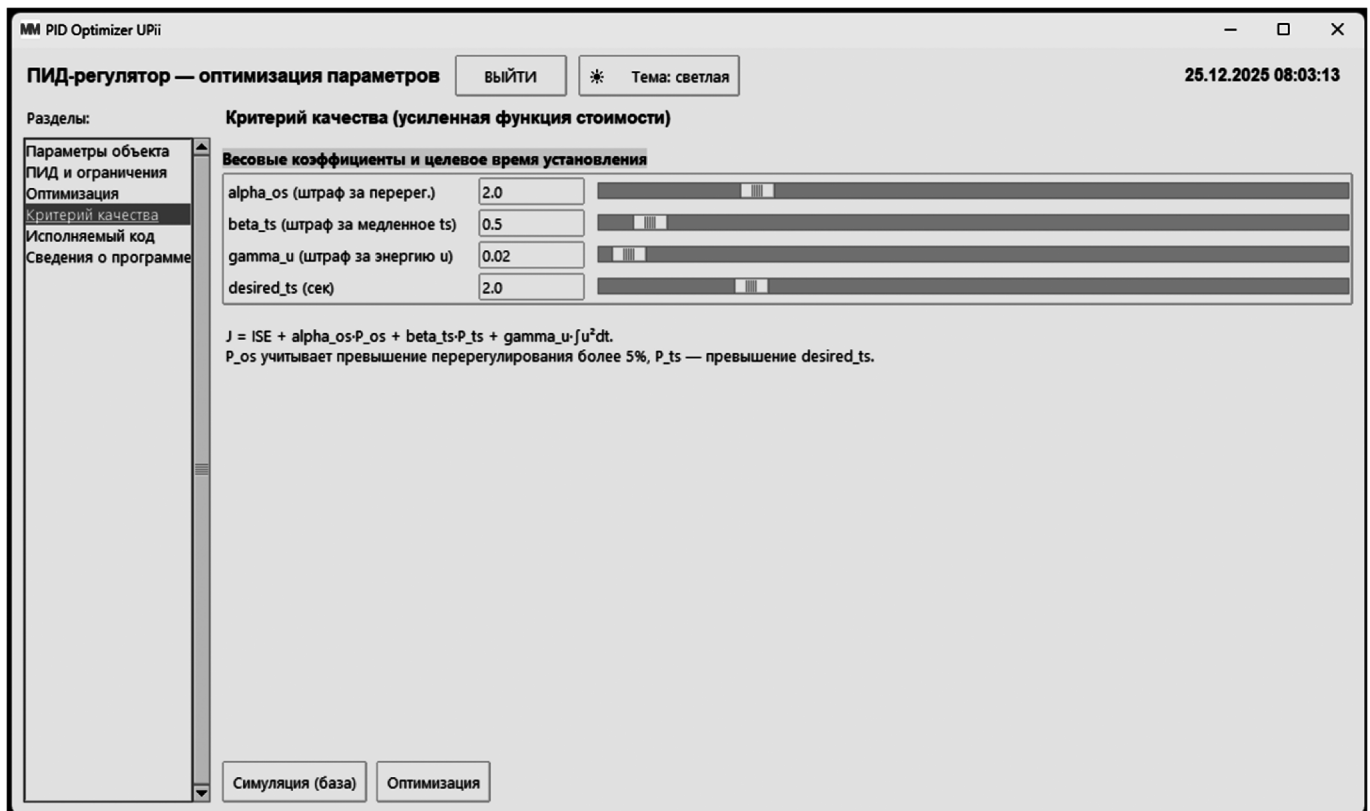


Рис. 4. Раздел «Критерий качества»: расширенная настройка параметров критерия оптимизации

Комбинации, приводящие к неустойчивости системы или выходу сигналов за допустимые пределы, автоматически исключаются из дальнейшего рассмотрения.

На последующих стадиях алгоритма диапазоны изменения параметров сужаются вокруг найденного лучшего решения, а поиск повторяется с более мелким шагом. Такой подход позволяет последовательно уточнять оптимальные значения параметров без существенного роста вычислительной сложности.

Задача оптимизации может быть формально записана следующим образом:

$$\theta^* = \underset{\theta \in \Omega}{\operatorname{argmin}} J(\theta), \quad (7)$$

где $\theta = (K_p, K_i, K_d)$ — вектор параметров ПИД-регулятора, Ω — допустимая область параметров, определяемая заданными диапазонами и ограничениями, $J(\theta)$ — критерий качества, заданный выражением (6).

Таким образом, алгоритм оптимизации сводится к последовательному исследованию области Ω и поиску такого набора параметров, при котором достигается минимальное значение целевой функции [5].

Для формализации и наглядного описания работы алгоритма ниже приведён псевдокод многостадийного сеточного поиска с адаптивным сужением диапазонов.

```

Задать начальные диапазоны параметров  $K_p, K_i, K_d$ 
Задать число стадий оптимизации
Для каждой стадии:
Сформировать сетку значений  $K_p, K_i, K_d$  в текущих диапазонах
Для каждой комбинации  $(K_p, K_i, K_d)$ :
Выполнить моделирование замкнутой системы
Если система неустойчива или нарушены ограничения:
Исключить комбинацию
Иначе:
Вычислить значение критерия качества  $J$ 
Определить комбинацию параметров с минимальным  $J$ 
Сузить диапазоны  $K_p, K_i, K_d$  вокруг найденного оптимума
Вернуть оптимальные значения параметров  $K_p, K_i, K_d$ 
    
```

Алгоритм 1. Псевдокод многостадийного сеточного поиска с адаптивным сужением диапазонов параметров ПИД-регулятора

Приведённый алгоритм отличается простотой реализации, отсутствием требований к вычислению градиентов и устойчивостью к нелинейному характеру критерия качества. Это делает его удобным для применения

в инженерных задачах и при разработке программных средств настройки регуляторов.

В разработанном программном приложении предусмотрена возможность интерактивной настройки параметров алгоритма оптимизации. В разделе «Оптимизация» пользователь может задавать:

- число стадий оптимизации;
- размеры сетки на каждой стадии;
- диапазоны изменения коэффициентов K_p, K_i, K_d .

Показаны параметры алгоритма оптимизации, определяющие глубину поиска и вычислительную сложность.

Наличие данного интерфейса позволяет адаптировать алгоритм под требования конкретной задачи управления, варьируя компромисс между точностью оптимизации и временем вычислений.

Вычислительная сложность алгоритма определяется количеством прогонов моделирования, которое на каждой стадии равно произведению размеров сетки по параметрам K_p, K_i и K_d . В реализованной конфигурации использование нескольких стадий с умеренными размерами сетки позволяет существенно сократить общее число вычислений по сравнению с полным перебором при сохранении качества найденного решения.

Алгоритм является полностью воспроизводимым, поскольку при фиксированных диапазонах параметров, шагах сетки и параметрах объекта управления результаты оптимизации не зависят от случайных факторов.

Таким образом, разработан алгоритм оптимизации параметров ПИД-регулятора, формализованный в виде многостадийного сеточного поиска и реализованный в программном приложении с пользовательским интерфейсом. На следующем этапе проводится вычислительный эксперимент, направленный на оценку эффективности алгоритма и сравнение базовой и оптимизированной настройки регулятора.

Экспериментальные исследования проведены методом математического моделирования замкнутой системы управления с ПИД-регулятором и апериодическим объектом второго порядка. Целью эксперимента является оценка эффективности предложенного алгоритма оптимизации параметров регулятора и сравнение результатов базовой и оптимизированной настройки по ключевым показателям качества управления.

Моделирование выполнялось при следующих параметрах объекта управления:

$$T_1 = 1.0, T_2 = 0.5, \quad (8)$$

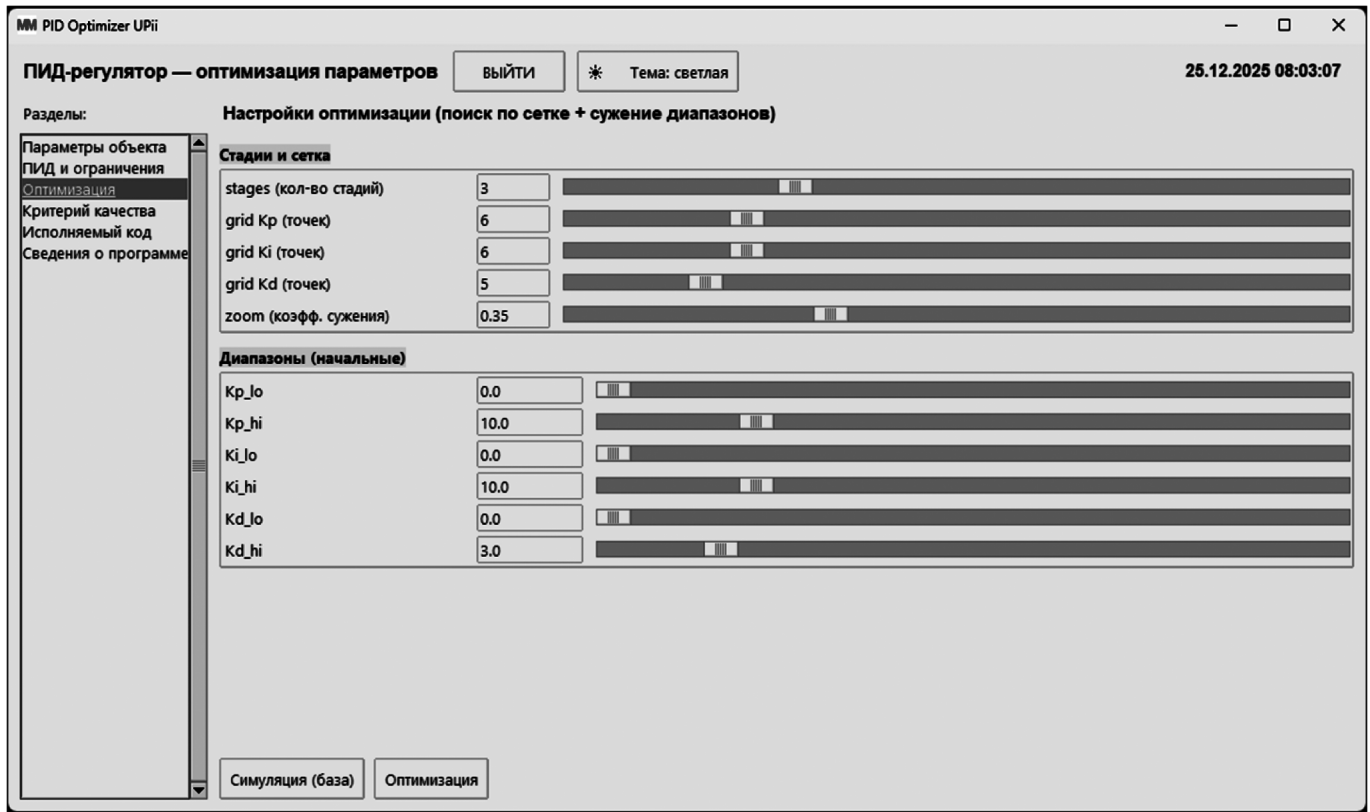


Рис. 5. Раздел «Оптимизация»: настройка параметров многостадийного сеточного поиска

шаг дискретизации по времени составлял

$$\Delta t = 0.01 \text{ с}, \tag{9}$$

а длительность моделирования —

$$T = 10 \text{ с}. \tag{10}$$

В качестве задающего воздействия использовался единичный скачок (unit step):

$$r(t) = 1. \tag{11}$$

Базовая настройка ПИД-регулятора была задана следующими значениями коэффициентов:

$$(K_p, K_i, K_d) = (2.0, 1.0, 0.2). \tag{12}$$

Оптимизация параметров выполнялась с использованием алгоритма, при фиксированных параметрах критерия качества и ограничениях на управляющее воздействие.

Результаты моделирования и оптимизации отображаются в отдельном окне результатов программного приложения. Базовая визуализация переходных процессов представлена на рисунках 6 и 7 для светлой и тёмной тем оформления интерфейса соответственно.

Отображены переходная характеристика $y(t)$, управляющее воздействие $u(t)$, ошибка регулирования $e(t)$ и сравнение коэффициентов ПИД-регулятора.

Визуализация результатов адаптирована под тёмную цветовую схему интерфейса.

Для более детального анализа предусмотрен расширенный режим отображения графиков, обеспечивающий удобство сравнения переходных процессов и масштабирование области отображения.

Показан режим детального анализа результатов моделирования.

Помимо графической визуализации, программное приложение предоставляет численные значения метрик качества управления и служебные диагностические сообщения. Данные результаты отображаются на вкладке «Вывод».

Отображены рассчитанные метрики качества и сообщения контроля вычислений.

В процессе выполнения оптимизации реализована индикация прогресса вычислений, что позволяет пользователю контролировать состояние длительных расчётов.

Показан режим выполнения оптимизации с отображением процента готовности.

Итоговые значения метрик качества для базовой и оптимизированной настройки ПИД-регулятора приведены в таблице 1.

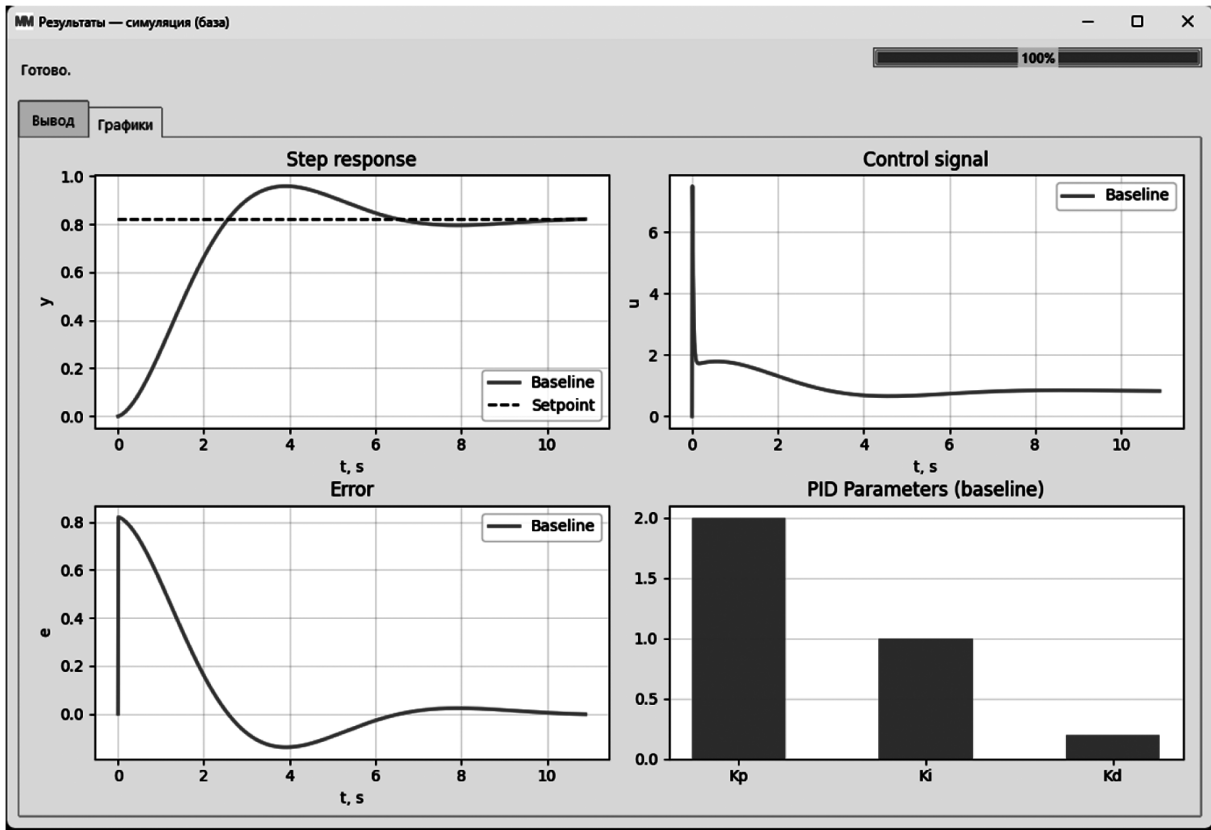


Рис. 6. Окно результатов: базовые графики моделирования в светлой теме

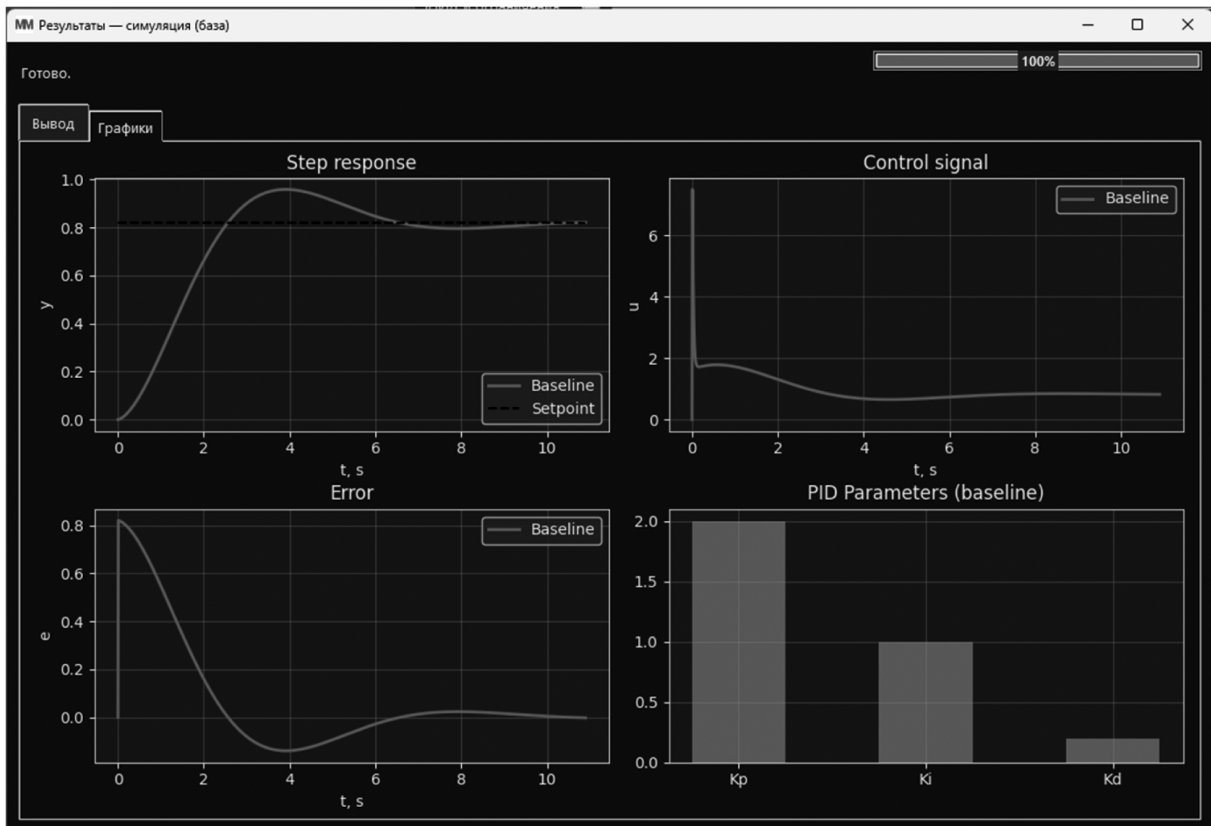


Рис. 7. Окно результатов: базовые графики моделирования в тёмной теме

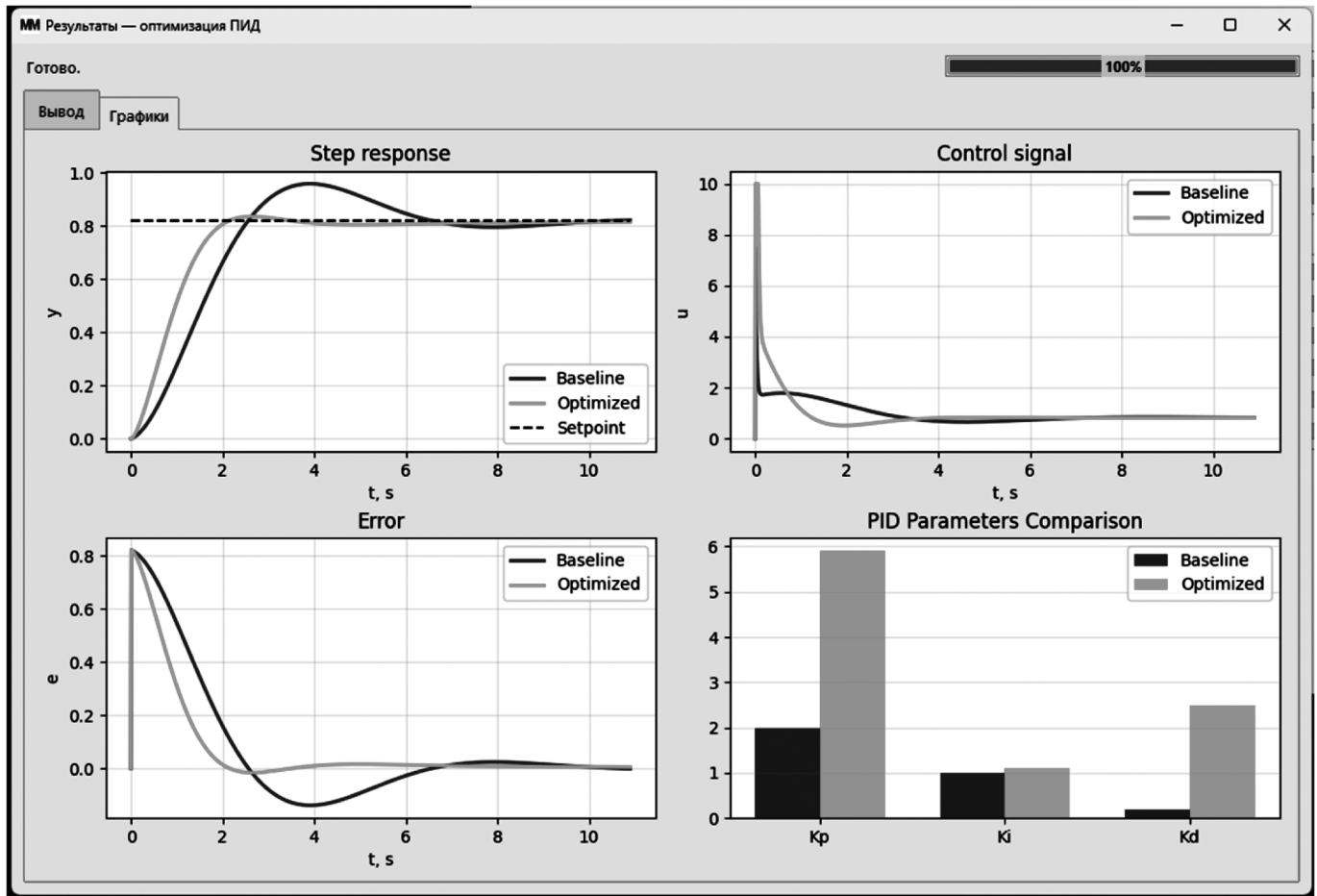


Рис. 8. Окно результатов: расширенная визуализация графиков

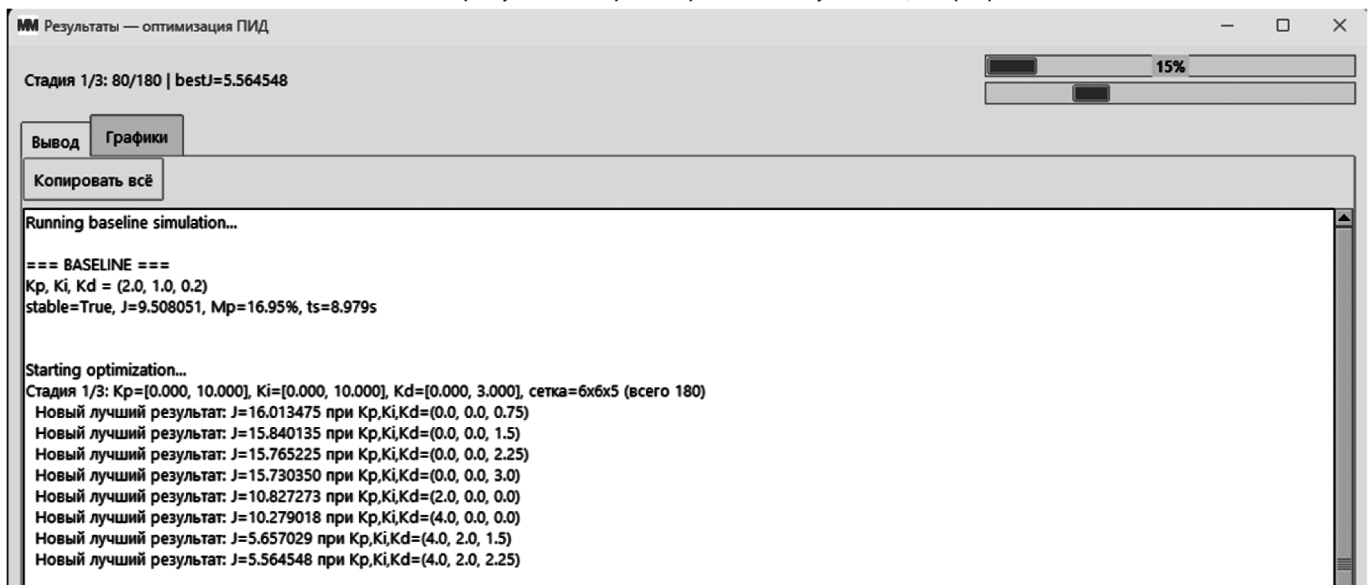


Рис. 9. Окно результатов, вкладка «Вывод»

Для базовой настройки система характеризуется отсутствием перерегулирования, однако демонстрирует сравнительно длительное время установления. После применения алгоритма оптимизации время установления сократилось более чем в четыре раза, при этом

перерегулирование составило 3.04 %, что не превышает допустимого уровня [1,3].

Итоговый вывод для базовой симуляции и пример выполнения оптимизации с анализом результатов представлены на рисунках 11 и 12 соответственно.

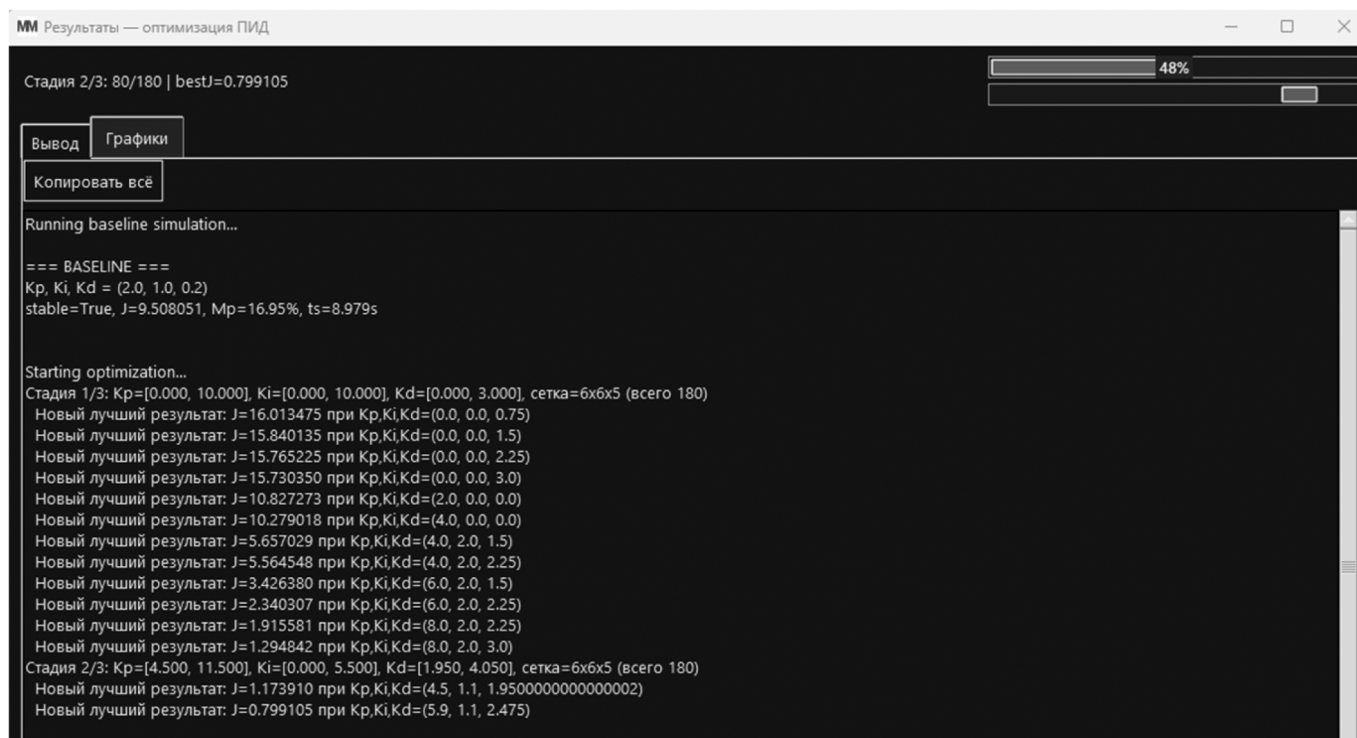


Рис. 10. Процесс вычисления: индикация прогресса и анимация загрузки

Таблица 1.
Сравнение показателей качества управления

Настройка	K_p	K_i	K_d	J	$M_p, \%$	t_s, c
Базовая	2.00	1.00	0.20	2.718722	0.00	5.98
Оптимизированная	5.41	2.81	0.975	0.650185	3.04	1.48

Представлены значения метрик качества для исходных параметров регулятора.

Показаны улучшенные параметры ПИД-регулятора и соответствующие показатели качества.

Анализ полученных результатов показывает, что предложенный алгоритм оптимизации обеспечивает существенное улучшение динамических характеристик системы управления. Значение интегрального критерия качества уменьшилось более чем в четыре раза, а время установления сократилось с 5.98 с до 1.48 с.

Небольшое увеличение перерегулирования компенсируется значительным ростом быстродействия системы и остаётся в пределах допустимых значений. Использование ограничений на управляющее воздействие и механизма anti-windup обеспечивает устойчивость моделирования и предотвращает возникновение неустойчивых режимов.

Таким образом, результаты вычислительного эксперимента подтверждают эффективность предложенного

алгоритма оптимизации параметров ПИД-регулятора и демонстрируют практическую применимость разработанного программного инструмента.

В настоящей работе разработан и исследован алгоритм оптимизации параметров ПИД-регулятора для апериодического объекта второго порядка. Алгоритм основан на минимизации расширенного интегрального критерия качества, учитывающего не только ошибку регулирования, но и показатели перерегулирования, времени установления и энергию управляющего воздействия. Такой подход позволяет более полно учитывать требования к качеству переходного процесса по сравнению с использованием одного интегрального критерия.

Предложенный алгоритм реализован в виде многостадийного сеточного поиска с адаптивным сужением диапазонов параметров. Это обеспечивает воспроизводимость результатов, устойчивость работы алгоритма и приемлемую вычислительную сложность без использования сложных методов глобальной оптимизации. В алгоритме также реализована отбраковка неустойчивых режимов, что повышает надёжность вычислительного эксперимента.

В рамках работы создан программный комплекс с графическим пользовательским интерфейсом, позволяющий интерактивно задавать параметры объекта управления, регулятора, критерия качества и алгоритма оптимизации, а также визуализировать результаты моделирования. Наличие интерфейса повышает нагляд-

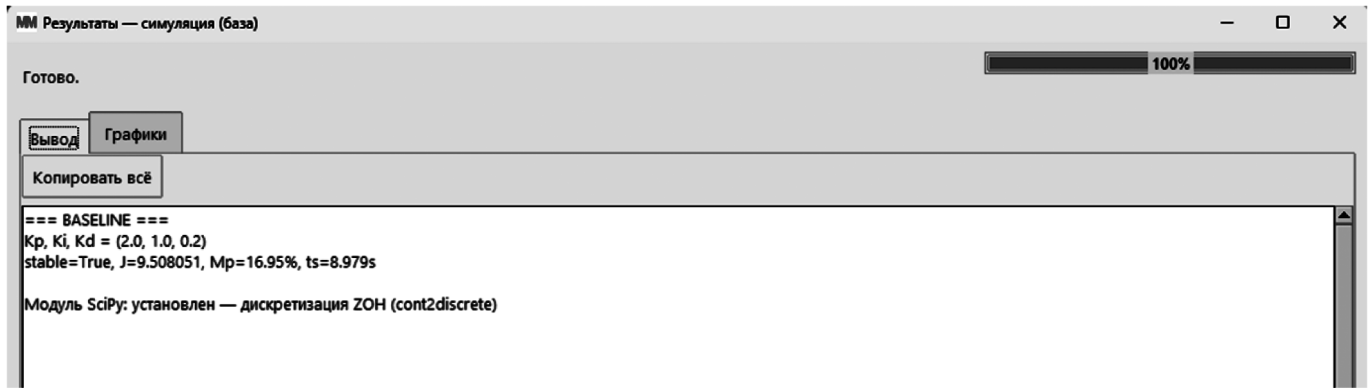


Рис. 11. Итоговый вывод для базовой симуляции

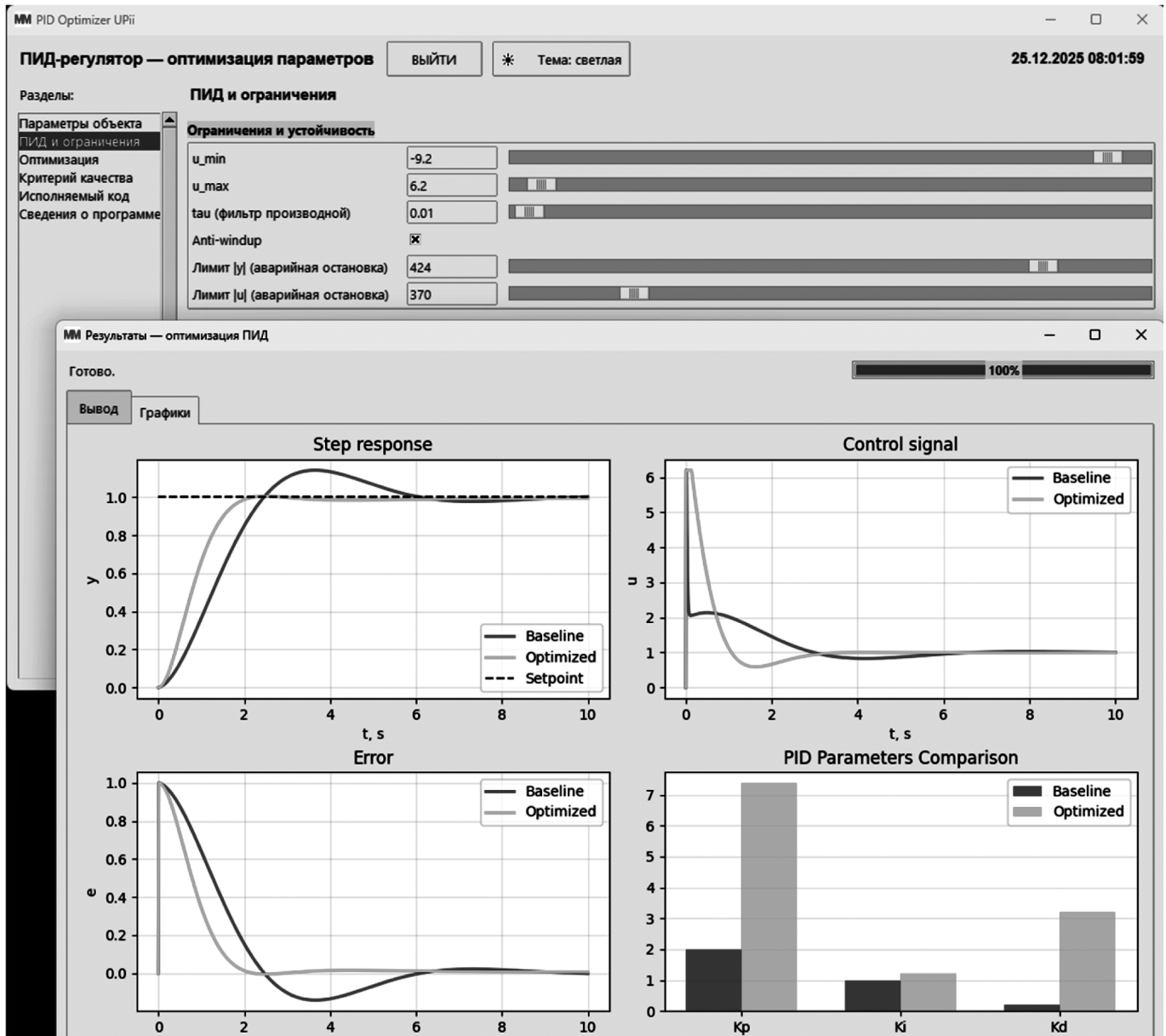


Рис. 12. Пример оптимизации: анализ результатов оптимизации

ность исследования, упрощает анализ переходных процессов и делает программный инструмент удобным для практического использования.

Результаты вычислительного эксперимента показали, что применение предложенного алгоритма оптимизации позволяет существенно улучшить динамические характеристики системы управления. В частности, время установления переходного процесса было сокращено более чем в четыре раза при сохранении устойчивости системы и допустимого уровня перерегулирования. Значение интегрального критерия качества также существенно уменьшилось по сравнению с базовой настройкой ПИД-регулятора.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанного программного инструмента на этапе проектирования и предварительной настройки систем автоматического управления, а также в учебных и исследовательских целях. Предложенный подход не требует применения физическое оборудования и может быть легко адаптирован для объектов с иными параметрами или дополнительными ограничениями.

В качестве направлений дальнейших исследований можно отметить расширение алгоритма на объекты более высокого порядка, учёт запаздывания в канале управления, а также исследование робастности оптимизированных параметров при изменении характеристик объекта управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nise N.S. Проектирование систем автоматического управления. — 8-е изд. — Хобокен: Wiley, 2020. — 944 p.
2. Franklin G.F., Powell J.D., Emami-Naeini A. Системы управления с обратной связью динамических систем. — 8-е изд. — Бостон: Pearson, 2019. — 896 p.
3. Dorf R.C., Bishop R.H. Современные системы управления. — 13-е изд. — Бостон: Pearson, 2017. — 1104 p.
4. Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A., Doyle F.J. Динамика и управление технологическими процессами. — 4-е изд. — Хобокен: Wiley, 2016. — 512 p.
5. Visioli A. Практическое применение ПИД-регуляторов. — 2-е изд. — Лондон: Springer, 2019. — 362 p.
6. Åström K.J., Hägglund T. Современные методы ПИД-регулирования. — Research Triangle Park: ISA, 2006. — 460 p.
7. Воронов А.А. Теория автоматического управления: в 2 т. Т. 1. Линейные системы. — М.: Высшая школа, 2009. — 367 с.
8. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Профессия, 2017. — 752 с.
9. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1: Линейные системы. — 3-е изд. — М.: Физматлит, 2013. — 288 с.
10. Фурман И.А. Теория автоматического управления и регулирования. — М.: Юрайт, 2020. — 384 с.
11. Солодовников В.В., Туманов А.С. Математические основы теории автоматического управления. — М.: Физматлит, 2012. — 456 с.
12. Skogestad S. Простые аналитические правила редукции моделей и настройки ПИД-регуляторов // *Journal of Process Control*. — 2003. — Vol. 13, No. 4. — P. 291–309.
13. Ang K.H., Chong G., Li Y. Анализ, проектирование и технологии ПИД-регулирования // *IEEE Control Systems Magazine*. — 2005. — Vol. 25, No. 1. — P. 50–65.

© Журавлева Марина Олеговна (marina_030405@mail.ru); Самохин Михаил Николаевич (miklesamoxin@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»