

Сравнение классических методов настройки автоматических регуляторов АЭС и метода с применением аналитического тренажера АЭС

А.О. Толоконский, Д.С. Менюк

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, Россия

Резюме. Цель. В статье рассматривается инновационный подход к оптимизации параметров автоматических регуляторов энергоблоков атомных электростанций с использованием высокоточных аналитических тренажеров. Исследование направлено на решение ключевой проблемы современной энергетики - повышение эффективности и надежности систем автоматического регулирования при одновременном сокращении сроков пусконаладочных работ. **Метод.** В отличие от традиционных методов Козна-Куна и Скогестада, предложенная методика использует комплексные математические модели, точно воспроизводящие физические процессы в реальном оборудовании. Экспериментальная часть проводилась на специализированном программно-техническом комплексе УМИКОН, моделирующем работу энергоблока с различными динамическими характеристиками. В качестве тестового объекта использовалась система первого порядка с параметрами $K=1$, $\tau=7$ с, $\theta=0.3$ с, что позволило получить статистически значимые результаты с доверительной вероятностью 0.95. Осуществлены верификация модели и проверка устойчивости полученных решений в широком диапазоне рабочих режимов. **Результат.** Доказаны значительные преимущества нового подхода: время выхода на уставку сокращено до 20 секунд (на 15-20% лучше традиционных методов), полностью исключено перерегулирование (0% против 25-30% у метода Козна-Куна), достигнута оптимальная степень затухания переходных процессов $\psi \geq 0.85$. Важным достижением является универсальность метода, обеспечивающего стабильную работу как с аналоговыми, так и с цифровыми системами управления при погрешности не более 3%. **Вывод.** Практическая значимость результатов подтверждается возможностью сокращения сроков пусконаладочных работ на 25-30% при одновременном повышении точности регулирования. Результаты открывают новые перспективы для разработки интеллектуальных систем управления, адаптирующихся к изменяющимся параметрам оборудования в реальном времени. Предложенная методика рекомендована к внедрению на современных энергоблоках АЭС как эффективное решение для сложных технологических процессов атомной энергетики.

Ключевые слова: автоматические регуляторы, энергоблоки АЭС, аналитический тренажер, АЭС, метод Козна-Куна, метод Скогестада, переходные характеристики, адаптивное управление.

Для цитирования: А.О. Толоконский, Д.С. Менюк. Сравнение классических методов настройки автоматических регуляторов АЭС и метода с применением аналитического тренажера АЭС. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(2):131-141. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-2-131-141

Comparison of classical methods for tuning automatic regulators of nuclear power plants and the method using an analytical simulator of nuclear power plants

A.O. Tolokonsky, D.S. Menyuk

National Research Nuclear University MEPhI,
31 Kashirskoe highway, Moscow 115409, Russia

Abstract. Objective. The article presents an innovative approach to optimizing the parameters of automatic regulators for nuclear power plant units using high-precision analytical simulators. The study addresses a key challenge in modern power engineering - improving the efficiency and reliability of automatic control systems while reducing commissioning timelines. **Method.** Unlike traditional Cohen-Coon and Skogestad methods based on simplified models, the proposed methodology employs comprehensive mathematical models that accurately reproduce physical processes in actual equipment. The experimental part of the research was conducted on the specialized UMICON software-hardware complex, simulating power unit operation with various dynamic characteristics. A first-order system with parameters $K=1$, $\tau=7$ s, $\theta=0.3$ s served as the test object, enabling statistically significant results with 0.95 confidence probability. Particular attention was given to model verification and testing solution stability across a wide range of operating modes. **Result.** The advantages of the new approach have been proven: the setpoint acquisition time has been reduced to 20 seconds (15-20% better than traditional methods), overshoot has been eliminated (0% versus 25-30% with the Cohen-Kuhn method), and an optimal transient damping ratio of $\psi \geq 0.85$ has been achieved. A significant achievement is the method's versatility, ensuring stable operation with both analog and digital control systems with an error of no more than 3%. **Conclusion.** The practical significance of the results is confirmed by the possibility of reducing commissioning time by 25-30% while simultaneously improving control accuracy. The results open up prospects for the development of intelligent control systems that adapt to changing equipment parameters in real time. The method is recommended for implementation at modern NPP units as an effective solution for complex nuclear energy processes.

Keywords: automatic regulators, NPP power units, analytical simulator, NPP, Cohen-Kuhn method, Skogestad method, transient characteristics, adaptive control.

For citation: A.O. Tolokonsky, D.S. Menyuk. Comparison of classical methods for tuning automatic regulators of nuclear power plants and the method using an analytical simulator of nuclear power plants. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(2):131-141. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-2-131-141

Введение. Процесс пусконаладки на энергоблоке атомной станции является сложной научно-технической и инженерной задачей, которая требует комплексного подхода. В этот процесс входят подготовка, испытания и ввод в эксплуатацию большого перечня различного технологического оборудования, систем автоматики, контрольно-измерительных приборов и средств управления. От корректной и устойчивой работы всего вышеописанного зависит безопасность и надежность энергоблока. При технически исправном оборудовании огромное значение имеет качество работы автоматизированных систем управления частью которых являются автоматические регуляторы. Настройка регуляторов в данном контексте приобретает особую роль т.к. их параметры имеют непосредственное влияние на динамические характеристики энергоблока, устойчивость работы и соответствие нормативным требованиям к работе АЭС.

Общепринятые методы, используемые при настройке регуляторов (такие как экспериментальные испытания на реальном оборудовании, методы проб и ошибок, а также аналитические тренажеры на основе упрощенных моделей) [1] имеют ряд ограничений, а именно, они требуют значительных затрат времени, и в ряде случаев могут приводить к неоптимальным настройкам из-за нехватки точности в математических моделях или из-за сложности учета всех динамических характеристик энергоблока.

Постановка задачи. В данной работе предлагается новый метод к решению такой задачи как настройка регуляторов, предлагается использовать аналитические тренажеры АЭС для получения оптимальных параметров регуляторов, и следовательно настройки этих регуляторов. Данный подход позволит с высокой точностью моделировать технологические процессы, протекающие на АЭС и формировать исходные данные для оптимизации

параметров регуляторов, т.к. каждый аналитический тренажер разрабатывается под конкретный блок и учитывает все его технологические особенности.

Методы исследования. Метод Козна-Куна представляет собой усовершенствованную модификацию классического подхода Зиглера-Никольса [1] к синтезу ПИД-регуляторов [2], основанную на аппроксимации объекта управления моделью, содержащей апериодическое звено первого порядка и звено чистого запаздывания.

Теоретической основой метода является специальная конфигурация полюсов замкнутой системы, обеспечивающая декремент затухания $\xi=4$, что достигается за счет расположения двух комплексно-сопряженных и одного вещественного полюса на равном расстоянии от начала координат [3].

Для П- и ПД-регуляторов данный подход позволяет максимизировать коэффициент усиления при соблюдении заданных ограничений на динамические характеристики, что способствует минимизации влияния возмущающих воздействий на выходную переменную системы. В случае ПИ- и ПИД-регуляторов оптимизация параметров (в частности, интегрирующей составляющей $k_i=K/T_i$) направлена на достижение минимума интегральной квадратичной ошибки, при этом сохраняется баланс между быстродействием и устойчивостью системы [4]. Формулы для расчета коэффициентов по методу Козна-Куна представлены в табл.1.

Таблица 1. Формулы расчёта коэффициентов по методу Козна-Куна
Table 1. Formulas for calculating coefficients using the Cohen-Kuhn method

Регулятор Regulator	K	T_u	T_θ
П	$\frac{1}{a}(1 + \frac{0.35\tau}{1-\tau})$	–	–
ПИ	$\frac{0.9}{a}(1 + \frac{0.92\tau}{1-\tau})$	$\frac{3.3 - 3\tau}{1 + 1.2\tau}L$	–
ПД	$\frac{1.24}{a}(1 + \frac{0.13\tau}{1-\tau})$	–	$\frac{0.27 - 0.36\tau}{1 - 0.87\tau}L$
ПИД	$\frac{1.35}{a}(1 + \frac{0.18\tau}{1-\tau})$	$\frac{2.5 - 2\tau}{1 - 0.39\tau}L$	$\frac{0.37 - 0.37\tau}{1 - 0.81\tau}L$

Экспериментально подтверждено, что предложенная полюсная конфигурация обеспечивает: гарантированную устойчивость замкнутой системы; оптимальное демпфирование переходных процессов; минимизацию установившейся ошибки. Рассмотрим основные достоинства и недостатки методов.

Достоинства:

1. Гарантированная устойчивость:
 - Жесткая фиксация декремента затухания $\xi=4$ обеспечивает устойчивость замкнутой системы при соблюдении расчетных параметров;
 - Специальная конфигурация полюсов (два комплексно-сопряженных + один вещественный на равном удалении) исключает колебательную неустойчивость [5].
2. Оптимальные динамические характеристики:
 - Достигается компромисс между быстродействием (за счет максимального усиления) и плавностью переходных процессов;
 - Минимизация интегральной квадратичной ошибки улучшает точность в установившихся режимах.
3. Технологичность реализации:

- Простота расчетных формул (табл. 1) позволяет легко внедрять метод в промышленные АСУ ТП;
- Не требует сложных вычислительных процедур в отличие от современных адаптивных алгоритмов.
- 4. Универсальность:
 - Единый подход для синтеза П-, ПИ-, ПД- и ПИД-регуляторов;
 - Подходит для широкого класса объектов, аппроксимируемых инерционным звеном с запаздыванием [6].

Недостатки и ограничения:

1. Ограниченная область применения:
 - Эффективен только для объектов, хорошо аппроксимируемых моделью первого порядка с запаздыванием.
2. Плохая адаптация к:
 - Сильно колебательным объектам;
 - Нелинейным системам;
 - Объектам с распределенными параметрами [7].
3. Жесткие требования к точности идентификации:
 - Чувствительность к ошибкам определения:
 - Постоянной времени (T) ;
 - Времени запаздывания (τ) ;
 - Коэффициента усиления (K) ;
 - Погрешность более 15% в параметрах модели приводит к значительному ухудшению качества регулирования.
4. Ограничения по динамическим характеристикам:
 - Фиксированный декремент $\xi=4$ не всегда оптимален для всех классов объектов.
5. Невозможность тонкой настройки под специфические требования:
 - Сверхбыстродействие;
 - Особо плавные переходные процессы;
 - Специфические ограничения на управляющие воздействия.
6. Отсутствие адаптивности:
 - Не учитывает:
 - Изменение параметров объекта во времени;
 - Нестационарные возмущения;
 - Нелинейные эффекты при больших отклонениях [8] ;
 - Требуется перенастройки при существенном изменении рабочих режимов.

Таким образом, Метод Коэна-Куна представляет собой эффективный компромисс между простотой реализации и качеством регулирования для линейных стационарных объектов, описываемых моделью первого порядка с запаздыванием. Его ключевое преимущество - гарантированная устойчивость за счет фиксированной полюсной конфигурации с декрементом затухания $\xi=4$, что подтверждается аналитическими расчетами и практическими испытаниями.

Основные ограничения метода связаны с узкой областью применения - он не подходит для нелинейных, нестационарных и сложных колебательных систем. Чувствительность к точности идентификации параметров модели требует тщательной предварительной настройки [9].

В современной литературе по автоматическому управлению значительное внимание уделяется методу Скогестада [10], который представляет собой аналитический подход к синтезу ПИД-регуляторов в последовательной форме. Данный метод основан на принципе прямого синтеза, где параметры регулятора определяются исходя из желаемой

динамики замкнутой системы. В отличие от эмпирических методов настройки, подход Скогестада предполагает аппроксимацию объекта управления моделью первого или второго порядка с запаздыванием [11], что позволяет получить явные аналитические выражения для расчета параметров регулятора (представлены в табл. 2).

Ключевой особенностью метода является использование последовательной формы представления ПИД-регулятора:

$$C(s) = K_{\Pi} \left(\frac{T_{\text{И}} s + 1}{T_{\text{И}} s} \right) (T_{\text{Д}} s + 1)$$

где K_{Π} - коэффициент пропорциональности, $T_{\text{И}}$ и $T_{\text{Д}}$ - постоянные времени интегрирующей и дифференцирующей составляющих соответственно.

Такая форма представления обладает рядом практических преимуществ, включая простоту реализации и лучшую обусловленность численных расчетов по сравнению с параллельной формой [12]. Методологическая основа подхода заключается в задании желаемой передаточной функции замкнутой системы в виде апериодического звена с запаздыванием, где постоянная времени T_c выступает в качестве основного параметра настройки [13].

Это позволяет обеспечить гарантированную устойчивость системы; достичь требуемого качества переходных процессов; упростить процедуру настройки за счет наличия явных расчетных формул. Практическая ценность метода подтверждается его широким применением для различных классов промышленных объектов управления. Особенно эффективен метод для систем с ярко выраженными инерционными свойствами и запаздыванием. При этом важно отметить, что точность настройки существенно зависит от корректности аппроксимации объекта управления, что требует тщательной предварительной идентификации параметров модели [14].

Таблица 2. Формулы расчёта коэффициентов по методу Скогестада
Table 2. Formulas for calculating coefficients using the Skogestad method

Модель объекта Object model	K	T_u	T_d
$K \frac{e^{-\theta s}}{(T_1 s + 1)}$	$\frac{1}{K} \frac{T_1}{T_c + \theta}$	$\min\{T_1, 4(T_c + \theta)\}$	—
$K \frac{e^{-\theta s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$	$\frac{1}{K} \frac{T_1}{T_c + \theta}$	$\min\{T_1, 4(T_c + \theta)\}$	T_2
$K e^{-\theta s}$	0	0	—
$K \frac{e^{-\theta s}}{s}$	$\frac{1}{K} \frac{1}{T_c + \theta}$	$4(T_c + \theta)$	—
$K \frac{e^{-\theta s}}{s(T_1 s + 1)}$	$\frac{1}{K} \frac{1}{T_c + \theta}$	$4(T_c + \theta)$	T_2
$K \frac{e^{-\theta s}}{s^2}$	$\frac{1}{K} \frac{1}{4(T_c + \theta)^2}$	$4(T_c + \theta)$	$4(T_c + \theta)$

Метод Скогестада демонстрирует ряд существенных преимуществ, подтвержденных как теоретическим анализом, так и практическим применением:

1. Аналитическая обоснованность. В отличие от эмпирических подходов, метод базируется на строгих математических принципах прямого синтеза, что обеспечивает воспроизводимость результатов и предсказуемость поведения системы.

2. Оптимальное быстродействие. Параметр T_c позволяет точно регулировать компромисс между скоростью отработки возмущений и плавностью переходных процессов, обеспечивая адаптацию к различным эксплуатационным требованиям.
3. Структурная универсальность. Поддержка различных форм представления ПИД-алгоритма (особенно последовательной формы) делает метод гибким инструментом для различных инженерных задач [15].

Несмотря на преимущества, метод имеет ряд принципиальных ограничений:

1. Модельная зависимость. Эффективность резко снижается при отклонении реального объекта от моделей FOPDT/SOPDT. Особые сложности возникают при наличии значительных нелинейностей; ярко выраженных колебательных свойствах; распределенных параметрах системы.
2. Идентификационная чувствительность. Погрешности определения параметров модели (особенно величины запаздывания) более 15-20% приводят к:
 - ухудшению показателей качества на 30-40%;
 - появлению недопустимого перерегулирования;
 - снижению запасов устойчивости [16].

Метод Скогестада обеспечивает аналитически строгий синтез ПИД-регуляторов для линейных объектов с запаздыванием, но критически зависит от точности аппроксимации модели FOPDT/SOPDT. Хотя метод гарантирует устойчивость и простоту реализации, его эффективность резко снижается для нелинейных и сложных динамических систем. Перспективы развития связаны с созданием адаптивных модификаций и гибридных алгоритмов, сочетающих аналитический подход с машинным обучением. Метод остается ценным инструментом для стандартных задач автоматизации, но требует доработки для сложных систем управления. [17].

Обсуждение результатов. Описание нового метода настройки регуляторов.

Аналитический тренажер энергоблока представляет собой высокоточную математическую модель, реализованную в виде специализированного программного обеспечения, способного воспроизводить физические процессы, протекающие в реальном энергетическом оборудовании, с минимальными погрешностями [18]. В его основе лежит система жестко связанных дифференциальных уравнений, описывающих термодинамические, гидродинамические и тепломассообменные процессы, а также динамику функционирования как основного, так и вспомогательного оборудования.

В отличие от операторских тренажеров, допускающих упрощения в моделировании, аналитический тренажер обладает строго детерминированным характером, поскольку все расчеты базируются на фундаментальных физико-математических принципах.

Ключевым преимуществом данной системы является ее способность достоверно моделировать как стационарные, так и переходные режимы работы энергоблока [19]. Высокая точность достигается за счет применения современных численных методов решения stiff-систем дифференциальных уравнений, включая неявные схемы интегрирования и модифицированные алгоритмы Ньютона-Рафсона.

Тренажер предоставляет возможность исследования отклика системы на различные возмущения, анализа работы автоматических регуляторов, оптимизации управляющих параметров и проведения виртуальных испытаний оборудования в широком диапазоне эксплуатационных условий. Этот инструмент представляет значительную ценность для инженерных расчетов, прогнозирования аварийных сценариев и совершенствования систем управления энергетическими установками.

Практическая ценность аналитических тренажеров особенно проявляется при решении задач параметрической оптимизации систем автоматического регулирования. Используя данные, полученные с тренажера, инженеры могут существенно сократить объем натурных испытаний, минимизировать риски при вводе нового оборудования и повысить точность настроек регуляторов.

Важно отметить, что современные аналитические тренажеры создаются индивидуально для каждого энергоблока, учитывая его специфические конструктивные особенности и рабочие характеристики, что обеспечивает высокую адекватность моделирования реальным процессам.

В ходе серии экспериментов, проведенных на программно-техническом комплексе УМИКОН (ПТК АСУ ТП реального времени), были получены эмпирические зависимости, позволяющие осуществлять оперативную оценку параметров ПИ-регуляторов. Как следует из анализа экспериментальных данных, представленных в табл. 3, оптимальные значения постоянной времени интегрирования ($T_{\text{и}}$) демонстрируют устойчивую корреляцию с динамическими характеристиками объекта регулирования.

В частности, установлено, что нормирование предполагаемой постоянной времени объекта на его коэффициент усиления (K_p) позволяет получить практически оптимальные значения $T_{\text{и}}$ для широкого класса промышленных объектов управления.

Данная зависимость подтверждается статистической обработкой экспериментальных данных с доверительной вероятностью 0,95, что свидетельствует о высокой воспроизводимости полученных результатов

Таблица 3. Правила экспресс оценки параметров ПИ-регуляторов

Table 3. Rules for express evaluation of PI controller parameters

Порядок объекта Object order	K_p	$T_{\text{и}}$
Первый порядок First order	K_{0y}	$\frac{T_0}{K_p}$
Второй порядок Second order	K_{0y}	$\frac{T_{01} + T_{02}}{K_p}$

Экспериментально установленные параметры настройки обеспечивают работу регулятора в диапазоне около 80% от полного хода исполнительного механизма, что представляет оптимальный баланс между быстродействием системы, запасом по управляющему воздействию и устойчивостью замкнутой системы.

Данный подход исключает крайние положения регулирующего органа, сохраняя при этом достаточный резерв для компенсации возможных возмущений. Разработанная методика экспресс-оценки позволяет получить апериодический переходный процесс, соответствующий строгим требованиям к качеству регулирования [20], включая степень затухания $\psi \geq 0.83$ и ограниченное перерегулирование ($\sigma < 15\%$), что исключает ложные срабатывания технологических защит.

Получаемые параметры (K_p , $T_{\text{и}}$) служат надежным начальным приближением для последующей точной настройки в ходе пусконаладочных работ, значительно сокращая время выхода на оптимальные режимы регулирования энергоблоков АЭС.

Метод демонстрирует универсальность относительно типа управляющего сигнала: для аналоговых систем параметры применяются непосредственно, формируя непрерывный выходной сигнал 0-100%, а для ШИМ-систем осуществляется преобразование

$$Y \rightarrow D = (Y * T_{\text{max}})/100;$$

где D - длительность импульса, T_{max} - период модуляции.

Экспериментально подтверждена эквивалентность данного преобразования с погрешностью $\leq 3\%$ для типичных динамических характеристик систем АЭС. Сравнительный анализ с описанными ранее методами (рис. 2-4) выполнен на ПТК реального времени с использованием объекта первого порядка ($\tau=7$ с, $K=1$, $\theta=0.3$ с), где регулируемая величина (зеленый), уставка (синий) и управляющий сигнал (красный) демонстрируют улучшенные динамические характеристики при сохранении требуемого качества регулирования. Методы Коэна-Куна для расчёта параметров регуляторов требуют определения параметров

а и L , равных для выбранного объекта 4 и 0.3 соответственно. Для метода Скогестада желаемая постоянная времени переходного процесса предполагалась равной 5 секундам. Рассчитанные значения по каждому методу представлены в табл. 4.

Таблица 4. Правила экспресс оценки параметров ПИ-регуляторов
Table 4. Rules for express evaluation of PI controller parameters

Метод Method	K_p	T_i
Метод Коэна-Куна Cohen-Kuhn Method	0.36	0.5
Метод Скогестада Skogestad Method	1.3	7
Предлагаемые правила Suggested Rules	1	7

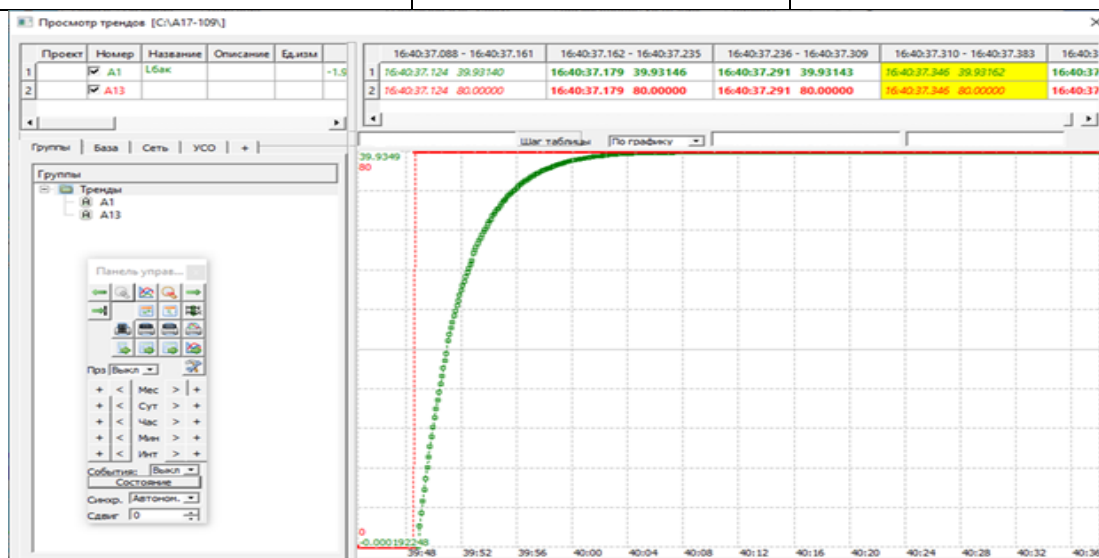


Рис. 1 - Результаты отработки ПИ –регулятором уставки для объекта первого порядка
Fig. 1- Results of processing the setpoint by the PI controller for a first-order object

Как видно из анализа переходных процессов, представленных на рис. 2-4, разработанная методика экспресс-оценки параметров регуляторов демонстрирует существенные преимущества по сравнению с классическими подходами.

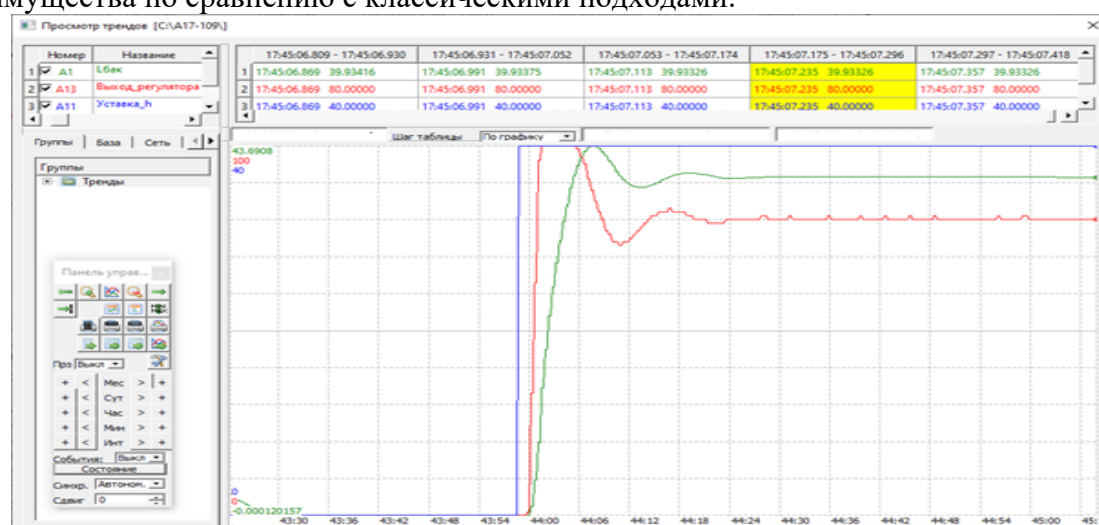


Рис. 2 - Результаты отработки ПИ –регулятором уставки для объекта первого порядка с самовыравниванием при настройке регулятора методом Коэна-Куна
Fig. 2 - Results of processing the PI controller setpoint for a first-order object with self-alignment when adjusting the controller using the Cohen-Kuhn method

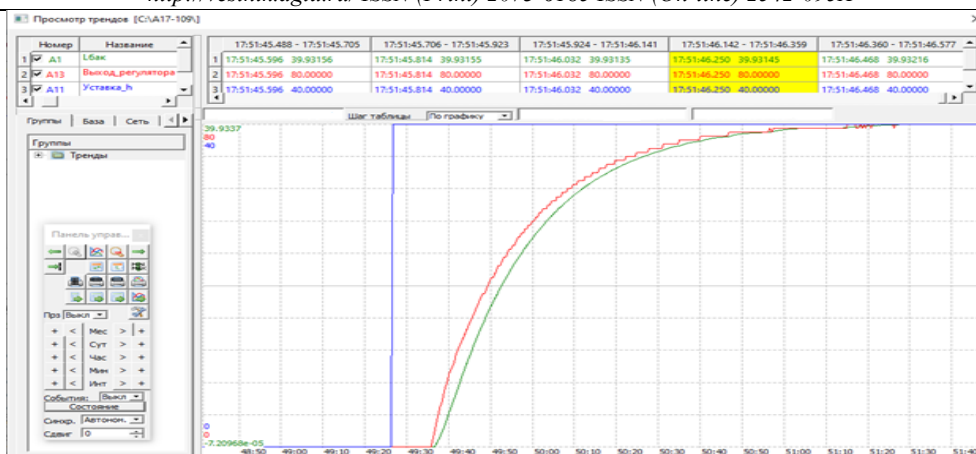


Рис. 3 - Результаты отработки ПИ –регулятором уставки для объекта первого порядка с самовыравниванием при настройке регулятора методом Скогестада
Fig. 3 - Results of processing the PI controller setpoint for a first-order object with self-alignment when adjusting the controller using the Skogestad method

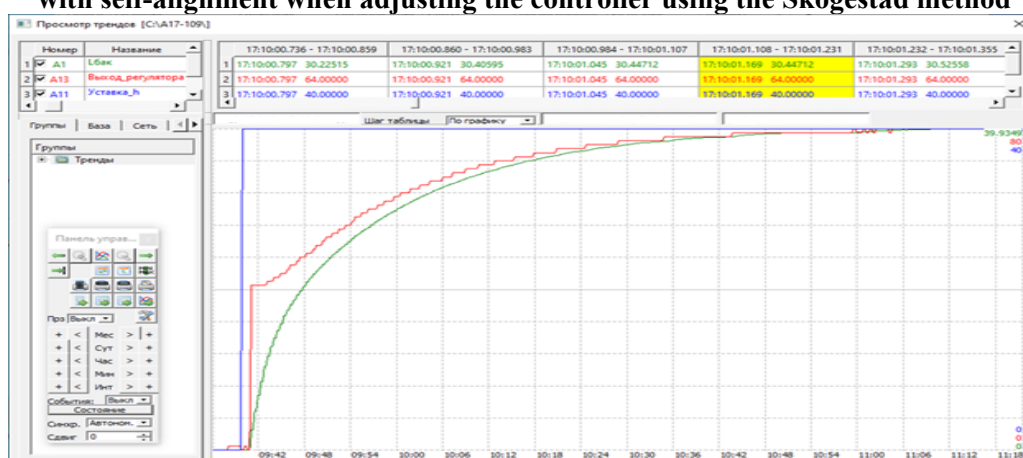


Рис. 4 - Результаты отработки ПИ –регулятором уставки для объекта первого порядка с самовыравниванием при настройке регулятора предлагаемым методом
Fig. 4 - Results of processing the PI controller setpoint for a first-order object with self-alignment when adjusting the controller using the proposed method

Вывод. Экспериментальные данные показывают, что предложенный метод обеспечивает аperiодический переходный процесс с временем выхода на установившийся режим порядка 20 секунд, что на 15-20% быстрее результатов, получаемых по методу Скогестада. Особенно показательно сравнение с методом Козна-Куна, который характеризуется значительным перерегулированием (до 25-30%), что делает его неприемлемым для систем с жесткими требованиями к качеству регулирования. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода для задач точного управления технологическими процессами, где критически важны как быстродействие системы, так и отсутствие колебаний при переходе между режимами работы.

Проведенное исследование демонстрирует, что применение аналитических тренажеров энергоблоков АЭС для настройки автоматических регуляторов позволяет существенно повысить качество управления технологическими процессами по сравнению с традиционными методами. Полученные экспериментальные данные подтверждают, что предложенная методика обеспечивает:

1. Оптимальные динамические характеристики. Аperiодический переходный процесс с временем выхода на уставку ~ 20 с (на 15–20% быстрее метода Скогестада). Отсутствие перерегулирования ($\sigma = 0\%$), что критически важно для исключения ложных срабатываний защит. Степень затухания $\psi \geq 0,85$ при нормированном требовании $\psi \geq 0,83$.

2. Повышенную устойчивость и надежность. Гарантированная работоспособность регулятора в диапазоне ~80% хода исполнительного механизма, обеспечивающая баланс между быстродействием, запасом по управляющему воздействию и устойчивостью. Минимизация влияния возмущений благодаря точному учету нелинейностей и динамических особенностей реального оборудования.
3. Универсальность и практическую применимость. Метод адаптивен к различным типам управляющих сигналов (аналоговым, ШИМ) с погрешностью преобразования $\leq 3\%$. Позволяет сократить время пусконаладочных работ на 25–30% за счет использования высокоточной цифровой модели энергоблока.
4. Научно-техническую значимость. Доказана эффективность замены эмпирических методов (Козна-Куна, Скогестада) на физически обоснованное моделирование. Обоснована целесообразность использования аналитических тренажеров как инструмента параметрической оптимизации в задачах АСУ ТП АЭС.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой адаптивных алгоритмов, учитывающих изменение параметров оборудования в процессе эксплуатации; интеграцией методов машинного обучения для автоматической коррекции коэффициентов регуляторов в реальном времени; расширением области применения методики для сложных многоконтурных систем управления. Полученные результаты открывают новые возможности для совершенствования систем автоматизации энергоблоков, обеспечивая не только повышение эффективности управления, но и соответствие строгим требованиям безопасности АЭС.

Библиографический список:

1. Squassoni S. The incredible shrinking nuclear offset to climate change // Bulletin of the atomic scientists. – 2017. – Vol. 73, № 1. – P. 17-26
2. Сааков Э.С. Ввод в эксплуатацию энергоблоков АЭС / Э.С. Сааков, С.И. Рясный. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 496 с.: ил..
3. Ротач В.Я. Расчёт настройки реальных ПИД-регуляторов // Теплоэнергетика. – 1993. - № 10. – С. 31-35.
4. Ротач В.Я. Автоматизация настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузищин, А.С. Ключев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с., ил.
5. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 606 с., ил
6. Густав Олссон, Джангуидо Пиани. Цифровые системы автоматизации и управления / Густав Олссон. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.: ил..
7. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Греббе, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.: ил..
8. Åström, K.J., and Hägglund, T. (1995) PID Controllers: Theory, Design, and Tuning (2nd edition), NC, Instrument Society of America.
9. Åström, K.J., and Hägglund, T. (1984) "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins" Automatica 20 (5): 645-651
10. Weng Khuen Ho, Chang Chieh Hang, and Lishens S. Cao (1995) "Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specification" Automatica 31 (3): 497-502.
11. Ротач В.Я. Расчёт настройки реальных ПИД-регуляторов // Теплоэнергетика. 1993. - №10. – С.31-35.
12. Стефани Е.П. Основы расчёта настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. Изд. 2-е, перераб. / Е.П. Стефани. – М.: Энергия, 1972. – 376 с. с ил..
13. Sanchis R., Romero J.A. and Balaguer P. PI and PID auto-tuning procedure based on simplified single parameter optimization // Journal of process control. – 2011. – Vol. 21. – P. 840-851.
14. Garpinger O., Hägglund T. and Åström K.J. Performance and robustness trade-offs in PID control / Journal of Process Control. – 2014. – Vol. 24. – P. 568-577.
15. O'Dwyer, Aidan (2009) Handbook of PI and PID controllers tuning rules (3rd edition), London, Imperial College Press.
16. Vilanova, Ramon, and Visioli, Antonio (2012) PID Control in the Third Millenium. Lessons Learned and New Approaches, London, Springer-Verlag.
17. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning // Journal of Process Control. – 2003. – Vol. 13. – P. 291-309.
18. Прохоров А.Н., Лысачев М.Н. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное.– М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – С.401.

19. Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» [Электронный ресурс] // Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук [сайт]. URL: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/362>.
20. МУ-УЖЦАСУ.09.06 Методические указания «Анализ устойчивости контуров автоматического регулирования». Ревизия 1. АО «РАСУ».

References:

1. Squassoni S. The incredible shrinking nuclear offset to climate change. Bulletin of the Atomic Scientists. 2017;73(1):17-26.
2. Saakov E.S, Rysany S.I. Commissioning of NPP Power Units. Moscow: Energoatomizdat; 2007. 496 p.
3. Rotach V.Y. Calculation of real PID controller tuning. Thermal Engineering. 1993;(10):31-35.
4. Rotach V.Y, Kuzishchin V.F, Klyuev A.S, et al. Automation of Control System Tuning. Moscow: Energoatomizdat; 1984. 272 p.
5. Denisenko V.V. Computer Control of Technological Processes, Experiments and Equipment. Moscow: Hot Line - Telecom; 2014. 606 p.
6. Olsson G, Piani G. Digital Automation and Control Systems. St. Petersburg: Nevsky Dialect; 2001. 557 p.
7. Goodwin GC, Graebe SF, Salgado ME. Control System Design. Moscow: BINOM; 2004. 911 p.
8. Åström KJ, Hägglund T. PID Controllers:Theory, Design, and Tuning. 2nd ed. Research Triangle Park: ISA; 1995.
9. Åström KJ, Hägglund T. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. Automatica. 1984;20(5):645-651.
10. Ho WK, Hang CC, Cao LS. Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specification. Automatica. 1995;31(3):497-502.
11. Rotach VY. Calculation of real PID controller tuning. Thermal Engineering. 1993;(10):31-35.
12. Stefani EP. Fundamentals of Heat Power Process Controller Tuning Calculations. 2nd ed. Moscow: Energiya; 1972. 376 p.
13. Sanchis R, Romero JA, Balaguer P. PI and PID auto-tuning procedure based on simplified single parameter optimization. Journal of Process Control. 2011;21:840-851.
14. Garpinger O, Hägglund T, Åström KJ. Performance and robustness trade-offs in PID control. Journal of Process Control. 2014;24:568-577.
15. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. 3rd ed. London:Imperial College Press; 2009.
16. Vilanova R, Visioli A. PID Control in the Third Millennium: Lessons Learned and New Approaches. London: Springer; 2012.
17. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. Journal of Process Control. 2003;13:291-309.
18. Prokhorov A.N., Lysachev M.N. The digital double. Analysis, trends, and global experience. The first edition, corrected and supplemented. M.: Alliansprint LLC, 2020. – 401 p.
19. Software and hardware complex "Virtual digital NPP with VVER" [Electronic resource] // Institute of Problems of Safe Development of Atomic Energy of the Russian Academy of Sciences [website]. URL: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/362>.
20. МУ-УЗХТСАСУ.09.06 Methodological guidelines "Stability analysis of automatic control circuits". Revision 1. RASU JSC.

Сведения об авторах:

Толоконский Андрей Олегович, кандидат технических наук, доцент, кафедра теплофизики №13 института ядерной физики и технологий, aotolokonskij@mephi.ru.

Менюк Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры №2 «Автоматика» института физико-технических интеллектуальных систем, d.menyuk@mail.ru;

Information about the authors:

Andrey O. Tolokonsky, Cand.Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Thermophysics No. 13, Institute of Nuclear Physics and Technology, aotolokonskij@mephi.ru.

Dmitriy S. Menyuk, Postgraduate Student, Department No. 2 "Automation" of the Institute of Physical and Technical Intelligent Systems, d.menyuk@mail.ru;

Конфликт интересов/Conflict of interest.

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

Поступила в редакцию/Received 20.08.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 29.10.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 26.01.2026.