

Оптимизация настройки ПИ-регуляторов в системах автоматического управления сложными технологическими процессами АЭС

Д.С. Менюк

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

Резюме. Цель. Статья посвящена настройке ПИ-регуляторов в системах управления сложными процессами на энергоблоках АЭС. **Метод.** Подчеркнуто применение методов теории автоматического управления для синтеза цифровых регуляторов, что упрощает проектирование. Особое внимание уделено преимуществам наладки регуляторов с использованием аналитических тренажеров. Они позволяют моделировать различные режимы работы, включая нештатные ситуации, что помогает устранить проблемы, такие как интегральное насыщение или потери устойчивости. Аналитические тренажеры ускоряют настройку, снижая затраты и повышая точность. **Результат.** Рассмотрены ключевые параметры настройки: коэффициент усиления (K_p) и постоянная времени интегрирования (T_N), влияющие на чувствительность и скорость реакции системы. Учтены ограничения оборудования, такие как мощность нагревателей и точность измерений. Описан модуль регулятора 1411 в ПТК ТПТС-НТ, обеспечивающий высокую точность и быстродействие благодаря циклу 23,3 мс и частотному диапазону до 21,5 Гц. Это позволяет эффективно обрабатывать входные воздействия и возмущения. **Вывод.** Сочетание ПТК ТПТС-НТ и аналитических тренажеров обеспечивает высокую точность, адаптивность и надежность систем управления, что критически важно для сложных процессов, таких как управление энергоблоками АЭС.

Ключевые слова: ПИ-регулятор, автоматическое управление, настройка регуляторов, коэффициент усиления

Для цитирования: Д.С. Менюк. Оптимизация настройки ПИ-регуляторов в системах автоматического управления сложными технологическими процессами АЭС. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(3):107-115. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-107-115

Optimization of PI controller tuning in automatic control systems for complex technological processes at Nuclear Power Plants

D.S. Meniuk

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

Abstract. Objective. The article focuses on the tuning of PI controllers in control systems for complex processes, such as those in nuclear power plant units. **Method.** The application of automatic control theory methods for synthesizing digital regulators is emphasized, simplifying the design process. Special attention is given to the advantages of tuning regulators using analytical simulators. They allow modeling various operating modes, including emergency situations, helping to eliminate issues such as integral windup or loss of stability. Analytical simulators accelerate the tuning process, reducing costs and improving accuracy. **Result.** Key tuning parameters are discussed: the gain coefficient (K_p) and the integration time constant (T_N), which affect the system's sensitivity and response speed. Equipment limitations, such as heater power and measurement accuracy, are taken into account. The regulator module 1411 in the PTC TPTS-NT software-hardware complex is described, providing high precision and speed due to a cycle time of

23.3 ms and a frequency range of up to 21.5 Hz. This enables effective processing of input signals and disturbances. **Conclusion.** The combination of the TPTS-NT software and analytical simulators ensures high accuracy, adaptability, and reliability of control systems, which is critical for complex processes such as nuclear power plant unit control.

Keywords: Proportional-Integral controller, Automatic control, controller tuning, proportional gain

For citation: D.S. Meniuk. Optimization of PI controller tuning in automatic control systems for complex technological processes at Nuclear Power Plants. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(3):107-115. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-107-115

Введение. Современные системы автоматического управления технологическими процессами требуют тщательной настройки параметров автоматических регуляторов для обеспечения их эффективной работы [1]. Различные методики настройки позволяют определить оптимальные значения коэффициентов для теоретических, идеальных регуляторов.

Постановка задачи. Однако реальные регуляторы, в отличие от идеальных, сталкиваются с рядом ограничений, обусловленных спецификой технологических процессов и техническими особенностями устройств, реализующих законы управления. Эти ограничения включают:

1. Ограничения на управляющее воздействие: например, максимальная мощность нагревателя или пропускная способность регулирующего клапана (определяемая его конструкцией и гидравлическими характеристиками) могут быть ограничены, что влияет на диапазон возможных управляющих воздействий.

2. Ограниченная точность измерений: сигналы, поступающие от датчиков, могут содержать погрешности, что требует дополнительной обработки данных для повышения точности регулирования.

3. Дискретная реализация регулятора: в реальных системах регуляторы часто работают в дискретном режиме, что накладывает дополнительные требования на их настройку и функционирование [2].

Учитывая эти особенности, настройка реальных регуляторов требует не только корректировки коэффициентов пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих (ПИД-регуляторов), но и учета других параметров, таких как время вызова регулятора, пороги срабатывания и минимальная длительность управляющих импульсов [3].

Методы исследования. Типичным примером программно-технических средств, реализующих законы управления, является программно-технический комплекс (ПТК) ТПТС, разработанный ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» [4]. Этот комплекс используется на различных атомных электростанциях (АЭС), причем на разных объектах применяются разные поколения ПТК. Например, на энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 используется ПТК ТПТС-НТ, который реализует регулирование с помощью модуля 1411. В этом модуле реализован алгоритм ступенчатого PI-регулирования RESI (с внутренней обратной связью). В сочетании с приводом, имеющим интегральную характеристику, данный алгоритм формирует PI-характеристику, что обеспечивает высокую точность регулирования [4].

Входным сигналом для регулятора является регулирующее отклонение (XD), которое представляет собой разницу между заданным и текущим значением регулируемого параметра. Выходные сигналы регулятора — это двоичные команды, такие как «Открыть» и «Закрыть», которые передаются на исполнительные механизмы. Алгоритм регулирования работает с нормированными значениями (от 0 до 100 %), что позволяет унифицировать обработку входных сигналов и упростить настройку системы [5].

Для обеспечения стабильной работы регулятора вызов его структур осуществляется в быстром цикле с периодом 23,3 мс. Это позволяет минимизировать:

- Задержки обработки сигнала (входные данные → расчёт управляющего воздействия → вывод).

- Фазовый сдвиг в системе, критичный для устойчивости. и повысить точность регулирования.

Регулятор, реализуемый модулем 1411, реализует ступенчатый PI-регулятор с дискретным выходом (команды «Открыть/Заккрыть»). Это алгоритм, имитирующий ПИ-закон за счет времени включения/выключения исполнительного механизма., выходы которого связаны с входом через звено задержки первого порядка [6]. Входной сигнал для переключателя формируется как разность между регулирующим отклонением (XD) и величиной, поступающей по каналу обратной связи. Порог срабатывания переключателя (ASWL) может быть фиксированным или адаптивным в зависимости от состояния входного сигнала ASWF. Если:

- ASWF = 1: порог фиксируется вручную (настройщиком).
- ASWF = 0: порог адаптируется автоматически с использованием фильтра первого порядка, который сглаживает изменения регулируемого параметра, предотвращая дребезг (граничные циклы).

Параметры регулятора, такие как коэффициент усиления (K_P) и постоянная времени интегрирования (T_N), настраиваются отдельно для каждого канала. В ПТК ТПТС-НТ каждый модуль 1411 может обслуживать несколько независимых каналов регулирования (например, 8 или 16, в зависимости от конфигурации). Здесь «каналы» - это отдельные контуры управления (например, температура, давление), а не каналы ввода-вывода [7]. Эти параметры могут быть заданы через запись в соответствующие маркеры констант или изменяться с помощью переменных. Диапазоны установок параметров следующие:

- $K_P = 0 - 1800/TY$ при $XD = 1 \%$, где TY - полное время хода исполнительного механизма.
- $T_N = 1 - 5000$ с.

Для регуляторов с дискретным выходом точность регулирования зависит от минимальной длительности управляющего импульса, заданного для исполнительного устройства [8]. Это приводит к тому, что регулирующее отклонение настраивается только в зависимости от минимальной длительности импульса, что может вызывать постоянное переключение между командами «ОТКРЫТЬ» и «ЗАКРЫТЬ» в области $XD = 0$.

Для предотвращения эффекта дребзга (граничных циклов) используется настройка порога срабатывания трехпозиционного переключателя [9]. Величина порога задается через вход ASWL (от 0 до 100 %) и активируется входом ASWF. После активации порог срабатывания становится постоянным и соответствует половине зоны нечувствительности.

Для объектов регулирования с компенсацией (звено задержки) порог срабатывания рассчитывается по формуле:

$$ASWL = MIMPL * 100 \% * KSTR / TY$$

где MIMPL - минимальная длина импульса, KSTR - коэффициент усиления объекта регулирования. Для объектов, у которых коэффициент усиления зависит от рабочей точки или изменяется со временем, порог срабатывания может автоматически адаптироваться к текущим условиям процесса [10].

Точность позиционирования комбинации регулятор/исполнительный механизм напрямую зависит от минимальной длины импульса. Например, если требуется точность позиционирования не более 0,5 %, то минимальная длина импульса должна быть установлена следующим образом:

$$MIMPL = 5 * TY / 1000.$$

Срок службы реверсивных исполнительных устройств значительно зависит от правильного режима их работы [11]. Например, при запуске двигателя важно, чтобы он отключался при достижении номинального тока, а не при высоком пусковом токе. Поэтому минимальная длина импульса должна быть установлена с учетом требований к работе исполнительного устройства.

В блоке регулятора минимальная длина импульса формируется с учетом паузы переключения в дополнительной ступени замедления, подключенной к трехпозиционному

Таким образом, настройка реальных регуляторов требует учета множества факторов, включая ограничения технологического процесса, особенности технических средств и требования к точности и надежности работы системы [12]. Установка минимальной длины импульса осуществляется с помощью входа MIMPL в мс. Внутри используется значение, кратное времени цикла 23.3 мс. Выбор при округлении осуществляется по сравнению со средним значением двух величин, которые кратны времени цикла, то есть округление идет как в одну, так и в другую сторону. Минимальная длина импульса может устанавливаться от 23.3 до 2963.3 мс.

Fig. 1 - PI controller parameters in TPTS-NT

Время цикла работы модуля регулятора 1411, используемого в программно-техническом комплексе ТПТС-НТ, составляет 23.3 мс. Такое значение времени цикла, в соответствии с теоремой Котельникова-Шеннона, обеспечивает частотный диапазон работы автоматического регулятора (АР) в пределах от 0 до 21.5 Гц. Данный диапазон полностью покрывает частотный спектр входных воздействий и внешних возмущений, характерных для различных технологических систем энергоблока атомной электростанции (АЭС) [14]. Благодаря этому, становится возможным применение методов теории автоматического управления для синтеза цифровых регуляторов, которые могут быть использованы для управления непрерывными системами. Это позволяет достичь высокой точности регулирования и устойчивости работы системы даже в условиях сложных технологических процессов, характерных для энергоблоков АЭС [15]. Таким образом, использование ПИ-регуляторов в сочетании с современными программно-техническими комплексами обеспечивает эффективное управление и контроль за работой технологических систем.

воздействия за счет: высокого быстродействия (частота дискретизации 42,9 Гц); адаптивных алгоритмов (антивиндулп, переменные пороги)

Такое исполнение делает возможным применение методов теории автоматического управления для непрерывных систем в цифровых регуляторах, что упрощает проектирование и настройку систем автоматизации энергоблоков. Кроме того, важным аспектом работы ПИ-регуляторов является их способность компенсировать статические ошибки за счет интегральной составляющей [16]. Однако для достижения оптимальной производительности (по критериям: время регулирования ≤ 20 сек, перерегулирование $\leq 10\%$, запас устойчивости $\geq 30^\circ$) необходимо учитывать влияние дискретизации сигналов, а также использовать методы цифровой фильтрации для минимизации задержек и искажений. необходимо учитывать влияние дискретизации сигналов, а также использовать методы цифровой фильтрации для минимизации задержек и искажений.

Однако, несмотря на то, что параметрический синтез автоматических регуляторов АСУ ТП АЭС можно проводить, используя классические методы теории управления, применяемые для синтеза непрерывных систем, необходимо учитывать следующие особенности реальных регуляторов:

1. Ограничения на управляющие воздействия.
2. Нелинейность типа «зона насыщения».
3. Эффект интегрального насыщения.
4. Периодический вызов регулятора: в реальных системах управления регулятор вызывается периодически.

Классические методы синтеза характеристик автоматических регуляторов, которые учитывают такие сложные эффекты, как интегральное насыщение, ограничения на управляющие воздействия и периодический вызов регулятора, традиционно требуют значительных временных и трудовых затрат. Эти методы часто предполагают проведение множества экспериментов, ручную настройку параметров регуляторов и длительные испытания в реальных условиях. Кроме того, классические подходы не всегда позволяют оперативно учитывать нелинейности и динамические особенности системы, что может привести к снижению эффективности управления и даже к потере устойчивости системы.

Однако современные технологии предлагают альтернативу в виде использования аналитических тренажеров, таких как тренажеры для моделирования технологических процессов энергоблоков АЭС.

Использование аналитических тренажеров значительно ускоряет процесс проектирования и настройки систем управления, снижает затраты на эксперименты и повышает точность синтеза характеристик. Это особенно важно для сложных и ответственных объектов, таких как энергоблоки АЭС, где требования к надежности и устойчивости системы управления крайне высоки. Таким образом, аналитические тренажеры становятся незаменимым инструментом для современных инженеров, позволяя создавать эффективные и устойчивые системы управления с минимальными временными и ресурсными затратами.

Аналитический тренажер энергоблока позволяет моделировать реальные ограничения на управляющие воздействия, такие как максимальная мощность нагревателей в тепловых системах. Это важно, так как в реальных условиях исполнительные механизмы имеют принципиальные ограничения по диапазону управляющих воздействий; ограниченный ресурс работы (количество циклов срабатывания). Тренажер учитывает нелинейность типа «зона насыщения», что помогает избежать ситуаций, когда управляющее воздействие выходит за допустимые пределы, но интегратор продолжает накапливать ошибку. Это предотвращает:

- Неконтролируемое перерегулирование (до 20-30% вместо допустимых 5-10%).
- Эффект «затягивания» - когда система застревает в насыщенном состоянии.
- Эффект интегрального насыщения (рис. 3) проявляется при:
 - Длительном отклонении параметра.
 - Ограничении управляющего воздействия.

На аналитическом тренажере можно заранее смоделировать такие ситуации и настроить регулятор так, чтобы минимизировать этот эффект.

Например, можно задать ограничения на интегральную составляющую или использовать методы анти-виндупа (anti-windup) представлен на рис. 2, который предотвращают избыточное накопление ошибки в интеграторе. Это позволяет избежать затягивания переходных процессов и снижает риск срабатывания технологических защит.

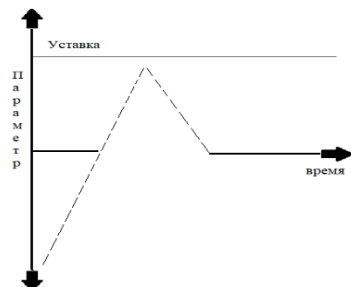


Рис. 2 - Переходный процесс с windup-эффектом

Fig. 2 - Transient process with windup effect

Периодический вызов регулятора (период выбирается исходя из: динамики процесса - не более 10% от постоянной времени объекта; механических ограничений - не чаще 1 срабатывания в 2-3 минимальных времени хода ИМ)

Это особенность цифровых систем управления, которая может привести к потере устойчивости, если период вызова выбран неправильно. Аналитический тренажер позволяет подобрать оптимальный период вызова, учитывая вычислительные ресурсы микропроцессора и динамику системы. Слишком маленький период увеличивает нагрузку на процессор, а слишком большой - приводит к расходящимся колебаниям. Тренажер помогает найти баланс, обеспечивая устойчивость системы и своевременное реагирование на изменения регулируемой величины.

Одним из главных преимуществ аналитического тренажера является скорость подбора оптимальных параметров регулятора (коэффициентов K_p и T_i). В отличие от традиционных методов (Зиглера-Николса), требующих, значительного времени и экспериментов [17]. Тренажер же позволяет быстро протестировать различные настройки регулятора в виртуальной среде, что значительно ускоряет процесс проектирования. Это особенно важно для сложных систем, таких как энергоблоки, где требуется высокая точность и надежность. Аналитический тренажер энергоблока учитывает специфику реальных систем управления, такие как нелинейности, ограничения на управляющие воздействия и периодичность вызова регулятора. Это позволяет ускорить настройку регуляторов, обеспечивающих в реальных условиях:

- Точность поддержания параметров $\pm 0.5\%$ от диапазона.
- Время отработки возмущений ≤ 20 сек.
- Запас устойчивости ≥ 6 дБ по амплитуде.
- Ресурс исполнительных механизмов $\geq 50,000$ циклов, а не только в идеализированных моделях. В результате, система управления становится более устойчивой, быстродействующей и надежной.

В качестве примера, подтверждающего тезис, обозначенный выше, рассмотрим настройку автоматических регуляторов в контуре регулирования давления в напорном коллекторе насосов подачи исходной воды на энергоблоке № 1 Белорусской АЭС.

Использование интегрированной системы моделирования «ЭНИКАД» [19] позволило проанализировать работу контура регулирования давления и выявить недостатки в предложенных проектной организацией параметрах настройки ведомого регулятора. Как показано на рис.3, исходные параметры регулятора частоты вращения не обеспечивали:

- Практической устойчивости (амплитуда автоколебаний давления достигала 2.5 бар при допустимых 1 бар).
- Стабильности работы (частота переключений насоса 15 циклов/час при норме 6).

– Быстродействия (время стабилизации после скачка нагрузки превышало 60 сек).
 Это приводило повышенному износу оборудования насосов; нестабильности давления в напорном коллекторе; риску срабатывания аварийных защит.

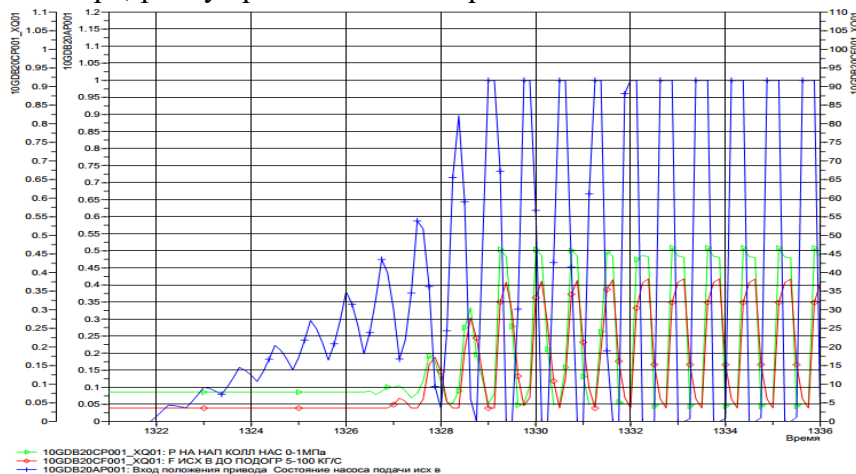


Рис. 3 - Тренды работы модели контура регулирования давления в напорном коллекторе насосов подачи исходной воды в интегрированной среде «ЭНИКАД»

Fig. 3 - Trends in the operation of the pressure control circuit model in the pressure manifold of the feed water supply pumps in the integrated environment "ENICAD"

Для устранения этой проблемы была применена методика настройки регулятора с использованием тренажёра водоподготовительной установки. В результате подбора параметров (в частности, уменьшения коэффициента пропорциональности) удалось достичь устойчивости контура регулирования, что подтверждается трендами на рис. 4.

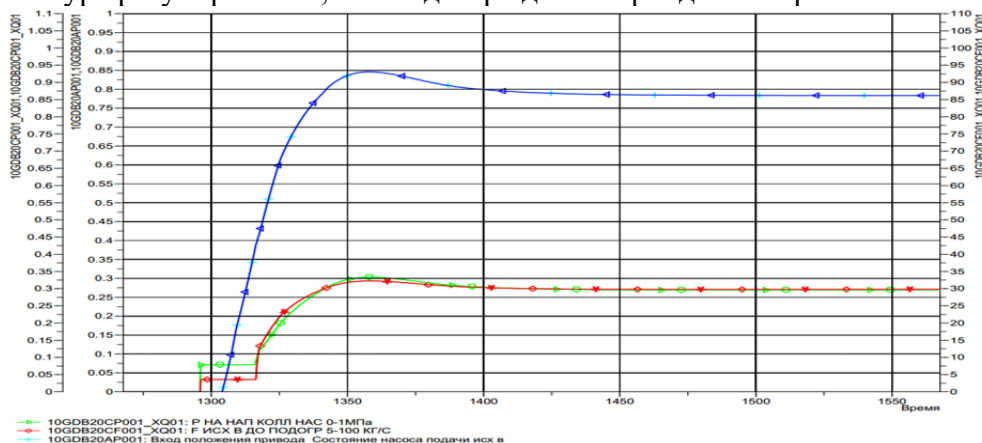


Рис. 4 - Тренды работы модели контура регулирования давления в напорном коллекторе насосов подачи исходной воды в интегрированной среде «ЭНИКАД» после подстройки регулятора частоты вращения вала насоса

Fig. 4 - Trends in the operation of the pressure control circuit model in the pressure manifold of the feed water supply pumps in the integrated environment "ENICAD" after adjusting the pump shaft speed controller

Таким образом, применение тренажёров для моделирования и настройки систем АСУ ТП демонстрирует свою эффективность в повышении точности, быстродействия и устойчивости работы сложных технологических процессов, таких как водоподготовка на энергоблоках АЭС [20].

Этот подход может быть успешно применён для оптимизации других контуров регулирования, что способствует повышению надёжности и производительности систем управления в целом.

Вывод. Использование аналитического тренажера энергоблока для настройки автоматических регуляторов — это современный и эффективный подход, который позволяет учитывать ключевые особенности реальных систем управления.

Такой инструмент помогает быстро находить оптимальные настройки регуляторов, минимизировать негативные эффекты и обеспечивать высокую производительность

системы. Это особенно важно для сложных и ответственных объектов, таких как энергоблоки, где ошибки в настройке регуляторов могут привести к серьезным последствиям.

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.
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.
5. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 606 с.
6. Густав Олссон, Джангуидо Пиани. Цифровые системы автоматизации и управления / Густав Олссон. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.
7. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Греббе, М.Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
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.
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./А.Н. Прохоров, М.Н. Лысачев – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил.
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. (In Russ)
3. Rotach V.Y. Calculation of real PID controller tuning. Thermal Engineering. 1993;(10):31-35. (In Russ)
4. Rotach V.Y., Kuzishchin V.F., Klyuev A.S., et al. Automation of Control System Tuning. Moscow: Energoatomizdat; 1984. 272 p. (In Russ)
5. Denisenko V.V. Computer Control of Technological Processes, Experiments and Equipment. Moscow: Hot Line - Telecom; 2014. 606 p. (In Russ)
6. Olsson G., Piani G. Digital Automation and Control Systems. St. Petersburg: Nevsky Dialect; 2001. 557 p.
7. Goodwin G.C., Graebe S.F., Salgado M.E. 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 K.J., Hägglund T. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. Automatica. 1984;20(5):645-651.
10. Ho W.K., Hang C.C., Cao L.S. Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specification. Automatica. 1995;31(3):497-502.
11. Rotach V.Y. Calculation of real PID controller tuning. Thermal Engineering. 1993;(10):31-35. (In Russ)

12. Stefani E.P. Fundamentals of Heat Power Process Controller Tuning Calculations. 2nd ed. Moscow: Energiya; 1972. 376 p. (In Russ)
13. Sanchis R., Romero J.A., 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 K.J. 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. A.N. Prokhorov, M.N. Lysachev – M.: Alliansprint LLC, 2020. – 401 p.(In Russ)
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>. (In Russ)
20. MU-UZHTSASU.09.06 Methodological guidelines "Stability analysis of automatic control circuits". Revision 1. RASU JSC. (In Russ)

Сведения об авторе:

Дмитрий Сергеевич Менюк, аспирант кафедры № 2 «Автоматика»; d.menyuk@mail.ru

Information about the author:

Dmitry S. Menyuk, Postgraduate Student, Department No. 2 "Automation"; d.menyuk@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.06.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 21.07.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 29.08.2025.