

А.О. Толоконский, Д.С. Менюк

**МЕТОД ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПИ-РЕГУЛЯТОРОВ
ДЛЯ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС**

Рассматриваются ключевые аспекты настройки параметров автоматических регуляторов, которые используются в системах управления технологическими процессами, в частности на атомных электростанциях (АЭС). Подчеркивается необходимость точной настройки регуляторов для обеспечения стабильности, эффективности и безопасности работы систем. Описываются традиционные методы настройки, такие как метод Зиглера-Николса и частотный анализ, которые, несмотря на свою надежность, требуют значительных временных затрат и точной математической модели объекта управления. В условиях современного производства, где важна оперативность, актуальны экспресс-методы, позволяющие сократить время настройки, однако их точность и универсальность остаются под вопросом. Особое внимание уделяется проблемам, возникающим при использовании реальных регуляторов, таким как интегральное насыщение и периодический вызов алгоритма регулирования. Интегральное насыщение может привести к ухудшению динамических характеристик системы и даже к срабатыванию технологических защит, а неправильный выбор периода вызова регулятора может вызвать потерю устойчивости системы. **Метод.** Предложен метод настройки ПИ-регуляторов, учитывающий динамические характеристики объектов управления и результаты экспериментальных исследований. Приведены рекомендации по выбору коэффициентов пропорциональности и постоянной времени интегрирования, которые позволяют достичь аperiodического переходного процесса, минимизировать риск насыщения и обеспечить высокое качество управления. **Результат.** Результаты моделирования, проведенного в программно-техническом комплексе «ЭНИКАД», подтвердили эффективность предложенного подхода. **Вывод.** Разработанные правила экспресс-оценки параметров регуляторов позволяют упростить процесс наладки, сократить время настройки и повысить надежность работы систем автоматического регулирования на АЭС. Это особенно важно для обеспечения безопасности и стабильности работы таких ответственных объектов, как атомные электростанции.

Автоматические регуляторы; настройка параметров; интегральное насыщение; периодический вызов регулятора; ПИ-регуляторы; аperiodический переходный; процесс; АСУ ТП АЭС; экспресс-методы настройки.

A.O. Tolokonsky, D.S. Menyuk

**A METHOD FOR EXPRESS ASSESSMENT OF PI-REGULATOR PARAMETERS
FOR APERIODIC TRANSIENT PROCESSES IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS
OF NUCLEAR POWER PLANT UNITS**

This article discusses the key aspects of setting the parameters of automatic regulators that are used in process control systems, in particular at nuclear power plants (NPP). The need for fine-tuning regulators is emphasized to ensure the stability, efficiency and safety of the systems. Traditional tuning methods such as the Ziegler-Nichols method and frequency analysis are described, which, despite their reliability, require significant time and an accurate mathematical model of the control object. In modern production conditions, where efficiency is important, express methods are relevant to reduce setup time, but their accuracy and versatility remain questionable. Special attention is paid to the problems that arise when using real regulators, such as integral saturation and periodic invocation of the control algorithm. Integral saturation can lead to a deterioration in the dynamic characteristics of the system and even to the activation of technological protections, and an incorrect choice of the period for calling the regulator can cause a loss of stability of the system. **Methods** A method for tuning PI controllers is proposed that takes into account the dynamic characteristics of control objects and the results of experimental studies. Recommendations are given on the choice of proportionality coefficients and the integration time constant, which make it possible to achieve an aperiodic transition process, minimize the risk of saturation and ensure high quality control. **Results** The results of experiments conducted on the UMICON software and hardware complex confirmed the effectiveness of the proposed approach. **Conclusion.** The developed

rules for rapid evaluation of regulator parameters make it possible to simplify the setup process, reduce setup time, and improve the reliability of automatic control systems at nuclear power plants. This is especially important to ensure the safety and stability of such critical facilities as nuclear power plants.

Automatic regulators; parameter setting; integral saturation; periodic regulator call; PI controllers; aperiodic transient; process; NPP automated process control system; express adjustment methods.

Введение. Автоматические регуляторы играют важную роль в обеспечении стабильной и эффективной работы современных технологических систем. Настройка параметров регуляторов является одним из важнейших этапов при введении сложного технологического объекта в эксплуатацию, который оказывает существенное влияние на качество переходных процессов, точность регулирования и устойчивость системы. Классические методы настройки, которые распространены на сегодняшний день, такие как метод Зиглера-Николса, частотный анализ или использование моделей объекта управления, зарекомендовали себя как надежные и проверенные временем подходы. Но, и они имеют недостатки, часто они требуют значительных временных затрат, глубоких знаний от специалистов и создания точной математической модели объекта, что не всегда возможно и целесообразно на реальном производстве.

Бурный рост технологий вызвал увеличение требований к скорости настройки регуляторов, что стало причиной создания экспресс-методов, которые дают возможность существенно снизить затраты времени на процедуру настройки за счет использования упрощенных алгоритмов и автоматизации процесса. Такие методы особенно актуальны в условиях ограниченного времени или при недостатке детальной информации об объекте управления. Но в свою очередь применение данных методов в реальных задачах вызывает вопросы, которые связаны с точностью и универсальностью их использования.

Несмотря на то, что настройку автоматических регуляторов АСУ ТП АЭС и синтез их характеристик можно проводить, применяя классические методы теории управления, которые используются для настройки непрерывных систем, следует при этом учитывать две особенности реальных регуляторов: интегральное насыщение и период вызова алгоритма регулирования. Ниже упомянутые особенности будут рассмотрены более подробно.

Основная часть. Существующие системы управления, которые используются в промышленности и реальных технологических процессах, имеют ряд ограничений, связанных с диапазоном управляющих воздействий, эти ограничения могут формироваться регулятором. Они обусловлены физическими и техническими характеристиками исполнительных механизмов и органов регулирования, которые имеют конечный ресурс управления. Например, в контуре регулирования температуры среды в тепловых системах верхним ограничением является максимальная мощность нагревательных элементов. Это означает, что регулятор не сможет выдавать управляющие сигналы, величина которых больше этого предела, даже если этого требует алгоритм управления. Таким образом, выход реальных регуляторов всегда ограничивается нелинейностью, известной как «зона насыщения».

Согласно данным в исследованиях, которые описаны в [1], проблема интегрального насыщения заключается в следующем: когда происходит достижение величиной управляющего воздействия зоны насыщения, а сигнал рассогласования на входе ПИ (ПИД)-регулятора остается ненулевым, интегральная составляющая регулятора накапливает ошибку [2]. При этом накопленное значение не оказывает реального воздействия на объект управления, так как выход регулятора уже достиг своего предела. Как результат система управления фактически переходит в режим, «разомкнутой системы», и это приводит к ухудшению ее динамических характеристик [3]. Эффект интегрального насыщения не только замедляет переходные процессы, но и может стать причиной срабатывания технологических защит, что негативно сказывается на стабильности и безопасности системы [4].

Второй особенностью реальных систем управления является периодический вызов регулятора. В цифровых системах управляющее воздействие формируется не непрерывно, а дискретно, в определенные моменты времени [5]. Это означает, что регулятор выполняет свои вычисления и выдает управляющий сигнал только в течение ограниченного

периода времени, после чего наступает ожидание следующего вызова. Период вызова алгоритма регулирования является критическим параметром, который требует особенно тщательного подбора [6]. При слишком коротком периоде возникнет чрезмерная вычислительная нагрузка на микропроцессор, а это в свою очередь станет причиной задержки в обработке данных и как следствие приведет к снижению производительности системы [7]. С другой стороны, слишком длинный период вызова может привести к расходящимся колебаниям в системе, что будет эквивалентно потере устойчивости. Это происходит по причине того, что система не успевает своевременно среагировать на изменения регулируемой величины, а это особенно критично в динамически изменяющихся условиях [8].

Учитывая описанные выше особенности, становится очевидной необходимость тщательного подбора параметров регулятора [9]. Важно найти такие значения коэффициентов пропорциональной и интегральной составляющих, при которых максимальное управляющее воздействие не будет превышать допустимый диапазон и не приведет к попаданию в зону насыщения. Кроме того, управляющее воздействие должно формироваться в течение периода вызова алгоритма регулирования, чтобы система оставалась устойчивой и эффективной [10]. Наглядной иллюстрацией этого утверждения служит рис. 1, на котором представлены графики выходных сигналов двух регуляторов: один из них работает с эффектом интегрального насыщения (кривая 1), а другой без него (кривая 2).

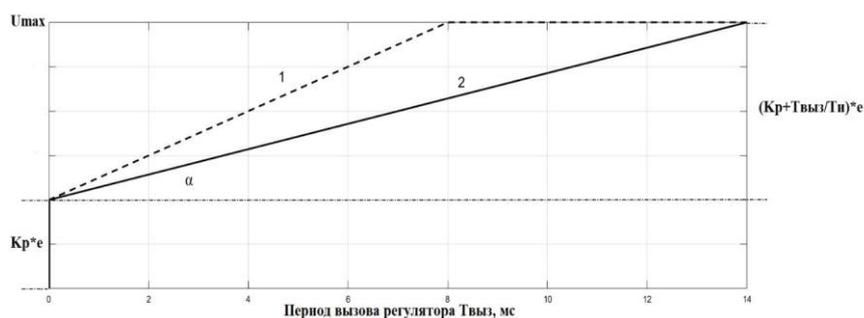


Рис. 1. Выходные сигналы регуляторов: с интегральным насыщением и без

Анализ рис. 1. позволяет сделать вывод, что величина управляющего воздействия, а следовательно, и вероятность возникновения интегрального насыщения, зависит от двух основных факторов. Первый фактор – это скачок управляющего сигнала, который определяется значением коэффициента пропорциональной составляющей. Этот параметр напрямую влияет на устойчивость переходного процесса. Второй фактор – это наклон прямой, который задается постоянной времени интегрирования ($\operatorname{tg} \alpha = 1/T_I$). Этот параметр отвечает за точность работы системы управления. Чем меньше постоянная времени интегрирования, тем быстрее система реагирует на изменения, но при этом возрастает риск возникновения насыщения [11].

Помимо параметров регулятора, важную роль играет максимальное возможное рассогласование на его входе [12]. Это значение зависит от диапазонов допустимых значений уставки и регулируемой величины. Максимальное рассогласование (e_{max}) делается как разность между максимальным значением регулируемой величины и минимальным значением уставки, или наоборот. Обычно границы этих диапазонов задаются одинаковыми, поэтому разности оказываются равными. Однако даже при максимальном рассогласовании регулятор не должен автоматически попадать в зону насыщения [13]. Этого удастся избежать благодаря нормировке сигнала рассогласования, которая выполняется модулями низовой автоматики в составе ПТК (программно-технического комплекса). Нормировка позволяет привести сигнал к стандартному диапазону, что исключает возможность некорректной работы регулятора даже при экстремальных значениях входных данных.

Таким образом, параметры ПИ-регулятора должны удовлетворять следующему условию:

$$K_{II} \times e_{\max} + \int_0^{T_{\text{ВВЗ}}} \frac{1}{T_{II}} \times e_{\max} dx \leq 100\% \quad (1)$$

После некоторых преобразований получаем:

$$K_{II} \times \frac{1}{T_{II}} \times T_{\text{ВВЗ}} \leq \frac{100\%}{e_{\max}} \quad (2)$$

При настройке параметров ПИ-регуляторов в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомных электростанций (АЭС) важно учитывать динамические характеристики объектов управления [14]. На начальном этапе настройки целесообразно устанавливать значения параметров регулятора, не превышающие эти характеристики. Это позволит избежать ситуации, при которой система управления будет фильтровать или игнорировать часть возможных значений уставок регулируемых параметров, что может привести к снижению эффективности управления. Особенно это актуально для АСУ ТП АЭС, где приоритетной задачей является отработка возмущений – внешних воздействий, которые могут нарушить стабильность работы системы [15].

Для объектов с самовыравниванием, которые составляют подавляющее большинство технологических объектов управления энергоблока АЭС, такой подход позволяет приблизиться к апериодическому переходному процессу. Апериодический процесс более удобен в случаях, когда регулирование величины должно происходить без колебаний т.к. характеризуется плавным изменением регулируемой. Также он является желательным и с точки зрения устойчивости и качества управления. Это особенно важно в управлении системами, где даже незначительные колебания могут привести к срабатыванию технологических защит и остановке оборудования [16].

В качестве начального приближения при настройке ПИ-регулятора можно использовать следующие рекомендации:

- ◆ Коэффициент пропорциональности (K_p) рекомендуется устанавливать равным коэффициенту усиления объекта управления. Это позволяет обеспечить пропорциональное реагирование регулятора на изменения регулируемой величины.
- ◆ Постоянная времени интегрирования (T_{II}) для объектов первого порядка может быть принята равной постоянной времени объекта управления. Для объектов второго порядка, которые характеризуются двумя постоянными времени, постоянная времени интегрирования должна быть установлена равной их сумме [17]. Это отражает динамические свойства таких объектов и позволяет учесть их инерционность.

При этом возможным запаздыванием в системе можно пренебречь, особенно если речь идет о длинных трубопроводах. Согласно исследованиям, такие объекты при отработке возмущений ведут себя как апериодические звенья, что упрощает их моделирование и настройку регуляторов.

Для проверки и уточнения параметров регуляторов были проведены эксперименты на программно-техническом комплексе (ПТК) УМИКОН [18], который может моделировать работу системы АСУ ТП сложных технологических объектов, таких как АЭС, ТЭС, в режиме реального времени. Результаты экспериментов, позволили сформулировать правила экспресс-оценки параметров ПИ-регуляторов. Эти правила представлены в табл. 1. и включают следующие рекомендации:

Таблица 1

Правила экспресс оценки параметров ПИ-регуляторов

Порядок объекта	K_p	T_{II}
Первый порядок	K_{ov}	$\frac{T_o}{K_p}$
Второй порядок	K_{ov}	$\frac{T_{o1}+T_{o2}}{K_p}$

♦ Постоянные времени интегрирования (T_{II}) следует делить на величину коэффициента усиления объекта управления. Это позволяет достичь приблизительно 80% положения органа регулирования, что исключает использование всего доступного ресурса и снижает риск насыщения.

♦ Такая настройка обеспечивает апериодический переходный процесс, который соответствует требованиям к качеству работы систем управления, указанным в [19]. В частности, степень затухания должна быть не ниже 0,83, а перерегулирование не должно вызывать срабатывание технологических защит

Основными преимуществами использования предложенных правил экспресс-оценки параметров ПИ-регуляторов являются:

- ♦ упрощение процесса наладки систем автоматического регулирования на энергоблоках АЭС.
- ♦ сокращение времени, необходимого для настройки;
- ♦ такой подход обеспечивает высокое качество управления, минимизируя риск возникновения колебаний и перерегулирования;
- ♦ снижение нагрузку на исполнительные механизмы органов регулирования, что увеличивает их срок службы и снижает вероятность поломок.

Практическое применение методики экспресс-настройки ПИ-регуляторов на примере водоподготовительной установки энергоблока №1 Белорусской АЭС

В ходе пусконаладочных работ 7 сентября 2019 года на энергоблоке №1 Белорусской АЭС была успешно применена разработанная методика экспресс-настройки ПИ-регуляторов для системы водоподготовки. Одним из объектов на котором методика была успешно реализована стал контур регулирования давления в напорном коллекторе насосов подачи исходной воды, который играет ключевую роль в обеспечении стабильной работы всего технологического комплекса, включающего механическую фильтрацию с ультрафильтрацией, двухступенчатое обессоливание методом обратного осмоса и ионообменную очистку пермеата.

Первоначальные параметры, представленные на рис. 2, ведомого регулятора частоты вращения вала насоса, предложенные проектной организацией, как видно из представленных трендов, не обеспечивали устойчивой работы контура регулирования, вызывая автоколебания и нестабильность технологического процесса.

Для стабилизации технологических процессов и оперативной наладки регуляторов использовались описанные выше правила экспресс-настройки. Эти правила были применены для коррекции коэффициента пропорциональности (с его уменьшением) и оптимизации постоянной времени интегрирования в соответствии с динамическими характеристиками объекта.

Проведенное моделирование в системе "ЭНИКАД"[20] дало возможность воспроизвести физические процессы в контуре регулирования и провести виртуальную настройку параметров, позволяя при этом избежать рисков, которые сопутствуют при натурных испытаниях. Поэтапная проверка устойчивости включала анализ переходных характеристик, проверку на отсутствие автоколебаний и оценку качества регулирования. В результате применения методики удалось полностью устранить автоколебания, обеспечить апериодический характер переходных процессов с требуемой степенью затухания ($\geq 0,83$), сохранив при этом высокое быстродействие системы.

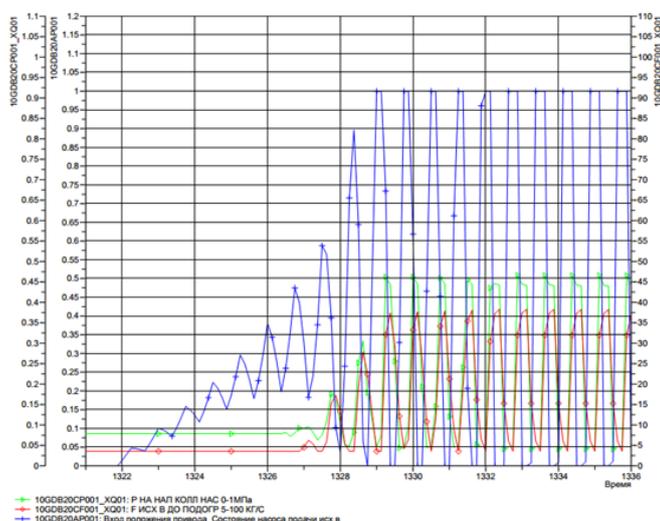


Рис. 2. Тренды работы модели контура регулирования давления в напорном коллекторе насосов подачи исходной воды в интегрированной среде «ЭНИКАД»

Полученные тренды работы регулятора в процессе моделирования выглядят более плавными и устойчивыми. Тренды работы модели контура регулирования с подстроенным регулятором частоты вращения вала насоса представлены на рис. 3. При этом подчеркивается важность учета реальных динамических характеристик объектов. А также дается наглядное представление преимуществ использования современных инструментов моделирования. Разработанная методика показала свою универсальность и может быть рекомендована для применения при наладке аналогичных систем на других энергоблоках АЭС, особенно учитывая возможность предварительной отработки параметров на тренажерных комплексах, что значительно снижает риски при проведении реальных пусконаладочных работ.

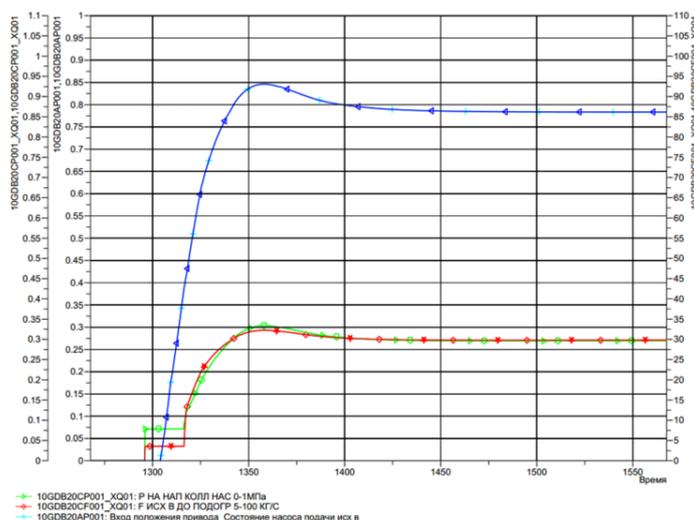


Рис. 3. Тренды работы модели контура регулирования давления в напорном коллекторе насосов подачи исходной воды в интегрированной среде «ЭНИКАД» после подстройки регулятора частоты вращения вала насоса

Выводы. Исходя из результатов, полученных в процессе решения реальной практической задачи можно сделать вывод, что, предложенный метод настройки ПИ-регуляторов, может эффективно применяться для обеспечения стабильной и качественной работы систем автоматического регулирования на атомных электростанциях. Этот метод позволяет не только упростить процесс наладки, но при этом повысить надежность и безопасность работы энергоблоков, что является одним из критически важных параметров для таких технологически сложных объектов, как АЭС.

Данные правила экспресс-оценки параметров регуляторов позволяют получить аperiodический переходный процесс, удовлетворяющий требованиям к качеству работы систем управления, указанным в [10]: степень затухания не ниже 0,83, возможное перерегулирование не должно вызывать срабатывание технологических защит. Значения рассчитываемых по предлагаемым правилам коэффициентов позволяют получить первое приближение для этапа наладки систем автоматического регулирования энергоблоков АЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. *Squassoni S.* The incredible shrinking nuclear offset to climate change // *Bulletin of the atomic scientists.* – 2017. – Vol. 73, No. 1. – P. 17-26.
2. *Сааков Э.С., Рясный С.И.* Ввод в эксплуатацию энергоблоков АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 496 с.
3. *Ротач В.Я.* Расчёт настройки реальных ПИД-регуляторов // *Теплоэнергетика.* – 1993. – № 10. – С. 31-35.
4. *Ротач В.Я., Кузицин В.Ф., Ключев А.С. и др.* Автоматизация настройки систем управления. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
5. *Денисенко В.В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 606 с.
6. *Густав Олссон, Джангуидо Пиани.* Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.
7. *Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э.* Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
8. *Åström, K.J., and Hägglund, T.* PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. – 2nd ed. NC, Instrument Society of America. 1995.
9. *Åström, K.J., and Hägglund, T.* Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins // *Automatica.* – 1984. – 20 (5). – P. 645-651.
10. *Weng Khuen Ho, Chang Chieh Hang, and Lishens S. Cao.* Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specification // *Automatica.* – 1995. – 31 (3). – P. 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. – 2-е изд., перераб. – 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.* Handbook of PI and PID controllers tuning rules. – 3rd ed. – London, Imperial College Press, 2009.
16. *Vilanova Ramon, and Visioli Antonio.* PID Control in the Third Millenium // *Lessons Learned and New Approaches.* – London, Springer-Verlag, 2012.
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. – 1-е изд., испр. и доп. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
19. Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР». 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, Vol. 73, No. 1, pp. 17-26.
2. Saakov E.S., Rysany S.I. Vvod v ekspluatatsiyu energoblokov AES [Commissioning of NPP power units]. Moscow: Energoatomizdat, 2007, 496 p.
3. Rotach V.Ya. Raschet nastroyki real'nykh PID-regulyatorov [Calculation of real PID controller tuning], *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1993, No. 10, pp. 31-35.
4. Rotach V.Ya., Kuzishchin V.F., Klyuev A.S. i dr. Avtomatizatsiya nastoyki sistem upravleniya [Automation of control system tuning]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 272 p.
5. Denisenko V.V. Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami, eksperimentami, oborudovaniem [Computer control of technological processes, experiments and equipment]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2014, 606 p.
6. Gustav Olsson, Dzhanguido Piani. Tsifrovye sistemy avtomatizatsii i upravleniya [Digital automation and control systems]. Saint Petersburg: Nevskiy Dialekt, 2001, 557 p.
7. Gudvin G.K., Grebe S.F., Sal'gado M.E. Proektirovanie sistem upravleniya [Control system design]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2004, 911 p.
8. Åström, K.J., and Hägglund, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd ed. NC, Instrument Society of America. 1995.
9. Åström, K.J., and Hägglund, T. Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins, *Automatica*, 1984, 20 (5), pp. 645-651.
10. Weng Khuen Ho, Chang Chieh Hang, and Lishens S. Cao. Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specification, *Automatica*, 1995, 31 (3), pp. 497-502.
11. Rotach V.Ya. Raschet nastroyki real'nykh PID-regulyatorov [Calculation of real PID controller tuning], *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1993, No. 10, pp. 31-35.
12. Stefani E.P. Osnovy rascheta nastroyki regulyatorov teploenergeticheskikh protsessov [Fundamentals of heat power process controller tuning calculations]. 2-e ed. Moscow: Energiya, 1972, 376 p.
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, pp. 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, pp. 568-577.
15. O'Dwyer Aidan. Handbook of PI and PID controllers tuning rules. 3rd ed. London, Imperial College Press, 2009.
16. Vilanova Ramon, and Visioli Antonio. PID Control in the Third Millenium, *Lessons Learned and New Approaches*. London, Springer-Verlag, 2012.
17. Skogestad S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning, *Journal of Process Control*, 2003, Vol. 13, pp. 291-309.
18. Prokhorov A.N., Lysachev M.N. Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt [The digital double. Analysis, trends, and global experience]. 1st ed. Moscow: OOO «Al'yansPrint», 2020, 401 p.
19. Programmno-tekhnicheskiy kompleks «Virtual'no-tsifrovaya AES s VVER» [Software and hardware complex "Virtual digital NPP with VVER"]. Institute of Problems of Safe Development of Atomic Energy of the Russian Academy of Sciences [website]. Available at: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/362>.
20. MU-UZHTSASU.09.06 Metodicheskie ukazaniya «Analiz ustoychivosti konturov avtomaticheskogo regulirovaniya». Reviziya 1. AO «RASU» [MU-UZHTSASU.09.06 Methodological guidelines "Stability analysis of automatic control circuits". Revision 1. RASU JSC].

Толоконский Андрей Олегович – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; e-mail: aotolokonskij@mephi.ru; г. Москва, Россия; кафедра теплофизики; к.т.н.; доцент.

Менюк Дмитрий Сергеевич – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; e-mail: d.menyuk@mail.ru; г. Москва, Россия; кафедра «Автоматика»; аспирант.

Tolokonsky Andrey Olegovich – National Research Nuclear University MEPHI; e-mail: aotolokonskij@mephi.ru; Moscow, Russia; the Department of Thermophysics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Menyuk Dmitriy Sergeevich – National Research Nuclear University MEPHI; e-mail: d.menyuk@mail.ru; Moscow, Russia; the Department "Automation"; postgraduate student.