

Исследование эффективности различных методик расчёта настройки ПИ-регулятора АСУ на примере контура ГВС ИТП

Рецензия эксперта на статью получена 16.11.2025 [The expert review of the article was received on November 16, 2025]

По состоянию на начало 2026 года теплоснабжение города Москвы обеспечивается от 11 462 тепловых пунктов: 6992 центральных (ЦТП) и 4470 индивидуальных (ИТП) [1]. Тепловой пункт выполняет приём теплоносителя, его преобразование, распределение между потребителями, учёт теплоснабжения, автоматически обеспечивая:

- необходимые параметры теплоносителя в системах отопления и вентиляции, что требуется для поддержания требуемых температурных условий в обслуживаемых помещениях;
- температуру воды в системе ГВС;
- согласование и стабилизацию гидравлических режимов в тепловых сетях и в системах теплоснабжения.

Одной из составных частей снижения тепловых потерь в тепловых сетях Москвы до 6% к 2034 году является повышение качества регулировки тепловых сетей и тепловых пунктов [2]. Повышение качества регулировки тепловых сетей и тепловых пунктов может быть реализовано в значительной степени за счёт анализа и оптимизации работы теплового пункта.

Для регуляторов центрального отопления (ЦО) и систем ГВС в ЦТП применяется пропорционально-интегральный закон регулирования (ПИ-регулирование) [2–4]. Параметры настройки ПИ-регулятора определяются свойствами объекта регулирования, если переходные характеристики объекта не заданы, их необходимо определить экспериментально. Если в результате исследований будут определены новые настройки регулятора, которые приведут к уменьшению интегрального

критерия, то качество процесса регулирования будет улучшено. В системах ГВС, независимо от схем присоединения, конфигурация измерителей и регуляторов АСУ одинакова — регулирование температуры в системе ГВС осуществляется в зависимости от показаний датчика температуры воды в соответствии с заданным значением 60–61 °С путём воздействия на исполнительный механизм.

По функциональному назначению тепловой пункт можно разделить на отдельные узлы, связанные между собой трубопроводами и имеющие обособленные или, в отдельных случаях, общие средства автоматического управления:

- **I** — узел ввода тепловой сети предназначен для возможности подключения/отключения ЦТП к коллектору теплосети, оснащается трубопроводами сетевой воды, запорной арматурой и грязевиками;
- **II** — узел учёта теплоснабжения предназначен для коммерческого учёта тепловой энергии, контроля за тепловыми и гидравлическими режимами работы систем теплоснабжающих установок и документирования параметров теплоносителя (массы/объёма, температуры и давления);
- **III** — узел присоединения систем вентиляции предназначен для подключения/отключения калориферов систем вентиляции, оснащается запорной арматурой;
- **IV** — узел системы ГВС предназначен для поддержания заданных параметров ГВС путём регулирования расхода теплосети через теплообменники ГВС второй ступени, он оснащается запорной арматурой, регуляторами, теплообменниками

УДК 621.1.016. Научная специальность: 2.3.3.

Исследование эффективности различных методик расчёта настройки ПИ-регулятора АСУ на примере контура ГВС ИТП

Сергей Вадимович Гужов, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **Андрей Андреевич Арбатский**, к.т.н., гендиректор ООО «НИИ «Энергоэффективных технологий микроклимата»»; **Елена Владимировна Крылова**, к.п.н., доцент, заместитель директора по учебной работе Института тепловой и атомной энергетики (ИТАЭ) НИУ «МЭИ»; **Дмитрий Васильевич Самусев**, ведущий инженер по КИПиА, ПАО «МОЭК»; **Анна Олеговна Сорокина**, студент, НИУ «МЭИ»

Рассмотрен состав систем отопления с центральными тепловыми пунктами, показаны исполнительные механизмы и их взаимосвязь с автоматизированной системой управления. Рассмотрен вопрос энергетической эффективности и обеспечения требований качества параметров теплоносителя в контурах горячего водоснабжения и отопления. Рассмотрены возможные причины отклонений температуры в контуре горячего водоснабжения (ГВС). На основании экспериментальных данных построены кривая разгона и переходная характеристика теплообменников ГВС, выполнен расчёт оптимальных параметров настройки регулятора ГВС. Выполнены расчёты оптимальных параметров настроек регуляторов по нескольким инженерным методикам. Приведён расчёт повышения эффективности при переходе на оптимальные параметры регулятора ГВС через операционные исчисления на основе преобразований Лапласа.

Ключевые слова: тепловой пункт, регулирование, центральное отопление, контур горячего водоснабжения, циркуляция, качество функционирования, коэффициент усиления, постоянная времени.

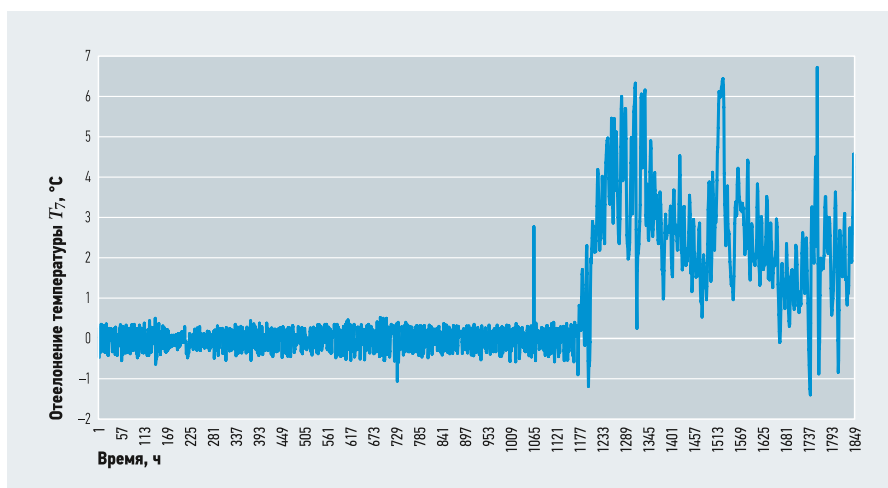
UDC 621.1.016. Scientific specialty number: 2.3.3.

A study of the effectiveness of various methods for calculating the settings of a PI controller for an automated control system using the example of a hot water supply system at a central heating point

Sergey V. Guzov, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Andrey A. Arbatsky**, PhD (Engineering), General Director of the "Research Institute of Energy-Efficient Microclimate Technologies", LLC; **Elena V. Krylova**, PhD (Pedagogical), Associate Professor, deputy director for Academic Affairs of the Institute Thermal and Nuclear Power Engineering of the NRU "MPEI"; **Dmitry V. Samusev**, senior instrumentation and control engineer, "Moscow United Energy Company", PJSC; **Anna O. Sorokina**, student, NRU "MPEI"

The article discusses the composition of heating systems with central heating units, showing the actuators and their relationship with the automated control system. The article also addresses the issue of energy efficiency and ensuring the quality requirements for the coolant parameters in the hot water supply and heating circuits. The article explores the possible causes of temperature deviations in the hot water supply (HWS) circuit. Based on experimental data, the article constructs the acceleration curve and the transient characteristic of the HWS heat exchangers, and calculates the optimal settings for the HWS regulator. The article also performs calculations of the optimal settings for the regulators using several engineering methods. The calculation of the increase in efficiency when switching to the optimal parameters of the DHW regulator through operational calculus based on Laplace transformations is given.

Key words: heat point, regulation, central heating, hot water circuit, circulation, quality of functioning, gain factor, time constant.



❖ Рис. 1. Отоклонение T_7 ГВС от заданного значения $+61\text{ }^{\circ}\text{C}$ за февраль — апрель 2024 года

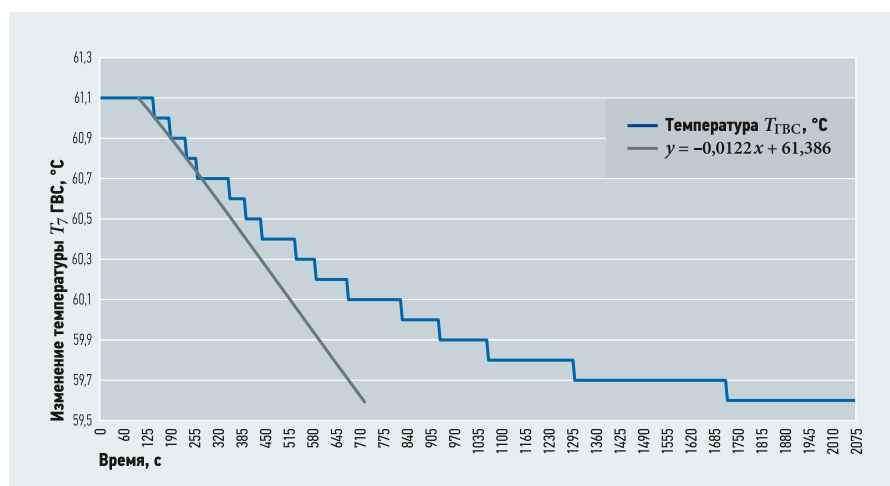
и циркуляционными насосами [5] (в системе применяются насосы с частотно-регулируемым приводом);

- V — узел присоединения систем отопления предназначен для поддержания заданных параметров отопления путём регулирования расхода теплоносителя теплосети через теплообменник ЦО, он оснащается запорной арматурой, регуляторами и пр.;

- VI — узел подпитки независимо присоединённых к тепловой сети систем теплоснабжения (отопления, вентиляции), предназначен для заполнения независимо присоединённых систем, а также их периодического пополнения (подпитка).

Подпитка осуществляется из обратного трубопровода тепловой сети через подпиточный трубопровод. Для компенсации изменения объёма теплоносителя в результате его нагрева и охлаждения в независимо присоединённых к тепловой сети системах отопления и вентиляции предусматривается установка расширительных баков [6].

Параметры работы системы ГВС. Холодная вода из городского водопровода под давлением $p_{\text{гор}} = 0,4\text{--}0,45$ МПа поступает на повысительный насос типа КМ100-80-160. Средний расход потребления ГВС составляет $6,3\text{ м}^3/\text{ч}$ зимой и $4,77\text{ м}^3/\text{ч}$ летом. Давление в подающем трубопроводе ГВС $p_7 = 0,58\text{--}0,89$ МПа. Давление в обратном трубопроводе ГВС $p_{13} = 0,48\text{--}0,77$ МПа. Циркуляционный трубопровод ГВС присоединён к трубопроводу нагреваемой воды между водоподогревателями первой и второй ступеней. Теплообменник ГВС первой ступени состоит из шести секций ПВ325×4-1,0РП, теплообменник ГВС второй ступени — из трёх секций ПВ325×4-1,0РП. Водопроводная вода после насоса ХВС с давлением $p_{\text{ХВС}} = 0,6$ МПа и средним расходом $5\text{--}6\text{ м}^3/\text{ч}$ поступает на подогрев в теплообменники ГВС первой и второй ступеней. В теплообменнике ГВС первой ступени вода подогревается теплосетью до



❖ Рис. 2. Кривая разгона теплообменника ГВС второй ступени

$55\text{--}59\text{ }^{\circ}\text{C}$, смешивается с водой циркуляционного контура ГВС $t_{13} = 51\text{--}59,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и с расходом 35 т/ч поступает на теплообменник ГВС второй ступени. В теплообменниках ГВС второй ступени вода подогревается теплосетью на $2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $T_7 = 56,4\text{--}61,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. После водоподогревателей первой и второй ступеней вода поступает на повысительный циркуляционный насос ГВС КМ100-80-160, который повышает давление до $p_7 = 0,8$ МПа и обеспечивает циркуляцию воды ГВС по двум подающим и двум циркуляционным трубопроводам ГВС со средним расходом 70 т/ч . Среднее количество тепловой энергии на подогрев ГВС составляет $Q_{\text{ГВС}} = 0,4\text{--}0,5\text{ Гкал/ч}$.

Регулирование температуры в системе ГВС осуществляется в зависимости от показаний датчика температуры TE7.1 в соответствии с заданным значением $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ путём воздействия на исполнительные механизмы клапана Г1-Y, соответственно.

Для проведения исследований выбран ЦТП в западном районе Москвы, в котором выявлены отклонения регулируемых параметров, оказывающие существенное влияние на качество функционирования ЦТП: завышение регулируемого параметра T_3 от графика $95/70\text{ }^{\circ}\text{C}$ выявлено в те-

чение 2640 ч (в среднем отклонение составило $+6,72\text{ }^{\circ}\text{C}$); занижение регулируемого параметра T_7 от заданного значения выявлено в течение 645 ч (в среднем отклонение составило $-2,22\text{ }^{\circ}\text{C}$), рис. 1.

Возможные причины отклонения T_7 :

- неправильные параметры настройки регулятора в шкафу комплектной автоматизации (ШКА) на базе контроллера МФК-1500 с программным обеспечением;
- неправильная конфигурация регулятора (в том числе механический дефект регулятора или привода, потеря силового питания привода);

- неправильная конфигурация теплообменников ГВС первой и второй ступеней (в определённых режимах не справляются с функцией подогрева ГВС).

По данным ведомостей технологических параметров, отклонений T_7 ГВС от заданного значения в январе 2024 года выявлено не было. В результате проведения исследований конфигурации регулятора ГВС не выявлено явных причин отклонения параметра T_7 . Исследования необходимо продолжить в следующем порядке:

- провести экспериментальные исследования теплообменника системы ГВС второй ступени;
- построить экспериментальную кривую разгона и переходную характеристику теплообменников системы ГВС;
- выполнить расчёт оптимальных параметров настройки регулятора ГВС (линейный интегральный показатель/квадратичный/модульный должен быть минимальным) для заданных значений корневого показателя колебательности $m = 0,221$ или $m = 0,366$;
- сравнить работу АСР с действующими и расчётными оптимальными параметрами настройки регулятора.

Сняты характеристики изменения T_7 ГВС (рис. 2).

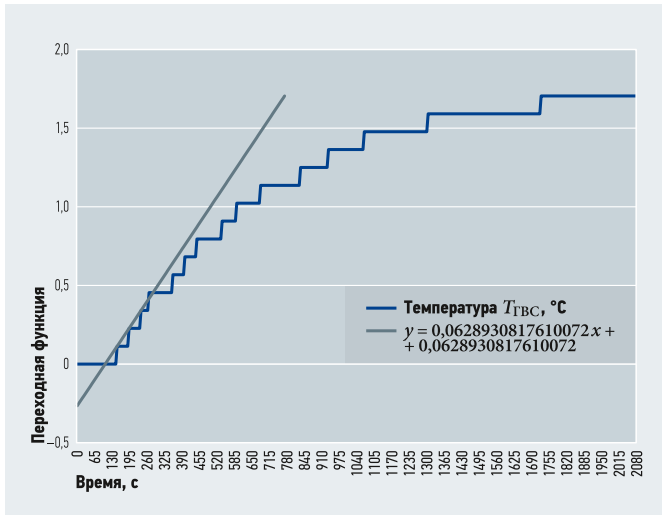


Рис. 3. Экспериментальная переходная характеристика теплообменника ГВС второй ступени

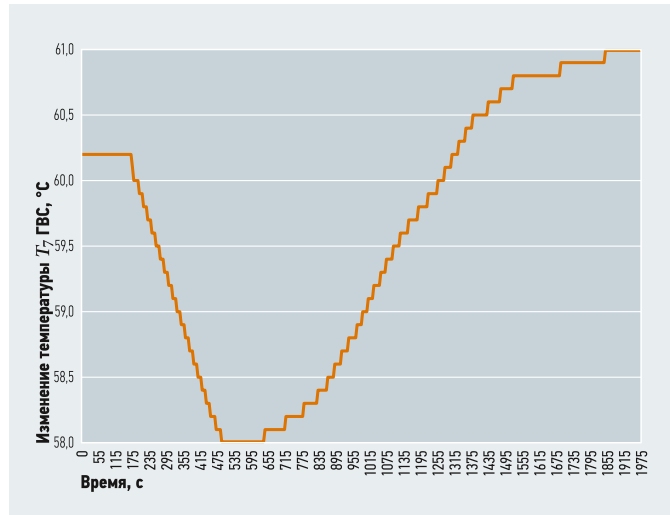


Рис. 4. Изменение T_7 ГВС при работе регулятора ГВС в режиме компенсации отклонений

Расчётные величины оптимальных параметров настроек регуляторов, полученные несколькими инженерными методиками

табл. 1

Параметр	Оценка ВТИ [7]	«Сибтех-энерго» [8]	Оценка Козна — Куна [9]	ЦНИИКА и МЭИ [10]	Преобразование Лапласа [11]	Параметры регулятора системы ГВС на объекте
K_p	2,263	2,347	3,02	1,765	1,1473	0,8
T_i	346,50	315,0	315,0	315,0	31,845	120
I_2	33,802	37,796	22,672	53,43	1,757	116,885
Y_{din}	0,235	0,262	0,131	0,345	0,061	0,49

По полученным данным построена переходная характеристика теплообменника ГВС второй ступени (рис. 3). Определены динамические параметры объекта ГВС второй ступени: коэффициент усиления $K = 1,704545$, постоянная времени $T_1 = 675$, $\tau = 105$. По результатам снятия характеристик изменения T_7 ГВС и изменения расхода теплоносителя построена кривая компенсации отклонения регулятором ГВС (рис. 4).

В результате проведения исследований работы регулятора ГВС в режиме компенсации внесённых отклонений T_7 (снижение с 61 до 58 °C) выявлено, что действующая конфигурация регулятора ГВС ($K_p = 0,8$ и $T_i = 120$) позволяет привести параметры T_7 к заданному значению 61 °C. Также выполнены расчёты оптимальных параметров настроек регуляторов несколькими инженерными методиками (табл. 1).

Анализ расчётных переходных процессов, выполненный по шести методикам, показывает, что интегральный показатель регулятора с параметрами, согласно расчёту (преобразование Лапласа), является наименьшим.

Динамическое отклонение регулятора с параметрами согласно расчёту (преобразование Лапласа) в 8,03 раза меньше, чем интегральный показатель регулятора с параметрами действующего регулятора ГВС, и в 2,15 раза меньше, чем интегральный показатель регулятора с параметрами по оценке Козна — Куна.

Показано, что настройки регулятора ГВС в шкафу автоматики ($K_p = 0,8$, $T_i = 120$) не являются оптимальными по интегральному показателю точности управления. Оптимальными параметрами настройки регулятора ГВС следует принять параметры согласно расчёту через операционные исчисления (преобразование Лапласа): $K_p = 1,1473$ и $T_i = 31,845$.

Далее проводится оценка эффективности устранения причин отклонений в ЦТП и приведения настроек регуляторов ГВС и ЦО к оптимальным (правильная конфигурация) и их влияние на

качество функционирования ЦТП и снижение тепловых потерь. Расчётные тепловые потери ЦТП на примере объекта, расположенного на западе Москвы, связанные с влиянием отклонения T_3 от заданного графика за отопительный период 2024–2025 годов, составляют 330,6 Гкал. Согласно утверждённым тарифам [12], в 2025 году стоимость 1 Гкал составила 3217,19 руб. Потери ПАО «МОЭК» за отопительный период (октябрь 2024 года — апрель 2025 года), связанные с завышением регулируемого параметра, составили 1,063 млн руб. ●

- О состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2022 году: информационно-аналитический доклад [Электр. ресурс]. Минэнерго России; Российское энергетическое агентство (ФГБУ «РЭА»). Режим доступа: minenergo.gov.ru. Дата обращения: 14.01.2026.
- Пикина Г.А., Пашенко Ф.Ф., Пашенко А.Ф., Косой А.А. Решение ряда теоретико-прикладных проблем вариационных методов оптимального управления // Датчики и системы, 2023. №6. С. 3–10.
- Аракелян Э.К., Красненко Д.М. Концепция моделирования и проектирования интеллектуальных измерительных датчиков // Новое в российской электроэнергетике, 2024. №12. С. 27–39.
- Пашенко Ф.Ф., Чан Д.Х., Аракелян Э.К., Красненко Д.М. Адаптивные алгоритмы в задаче моделирования энергетических объектов // Новое в российской электроэнергетике, 2023. №5. С. 28–39.
- Яковлев И.В., Авдокунин Н.В., Горелов М.В. Экономия и затраты энергии при обеспечении тепловых режимов центров обработки данных, охлаждаемых наружным воздухом // Промышленная энергетика, 2025. №1. С. 41–49.
- Криницкий Е.В., Жерягин М.Д., Маскинская А.Ю. Прикладные аспекты координации цифровых информационных моделей инженерных систем зданий в MagiCAD для Revit // Журнал СОК, 2022. №1. С. 12–16.
- Метод ВТИ для приближенного расчёта оптимальной настройки регулятора нагрузки [Электр. текст]. Файловый архив студентов Studfile. Режим доступа: studfile.net. Дата обращения: 20.02.2026.
- Статическая настройка регулирующих устройств АСР температуры пара нагрузки [Электр. текст]. Файловый архив студентов Studfile. Режим доступа: studfile.net. Дата обращения: 20.02.2026.
- Расчёт настроек по методу Козна — Куна нагрузки [Электр. текст]. Файловый архив студентов Studfile. Режим доступа: studfile.net. Дата обращения: 20.02.2026.
- Новиков С.И. Оптимизация автоматических систем регулирования теплоэнергетического оборудования: учеб. пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Ч. 1. 108 с.
- Использование обратного преобразования Лапласа для анализа динамических звеньев систем управления нагрузки [Электр. текст]. «Хабр»/Scorobey от 10.01.2018. Режим доступа: habr.com. Дата обращения: 20.02.2026.
- Об установлении на 2024–2028 годы долгосрочных тарифов на тепловую энергию (мощность) и на услуги по передаче тепловой энергии для ПАО «МОЭК»: Приказ Департамента экономической политики и развития г. Москвы №ДПП-ГР-285/23 от 15.12.2023.

References — see page 78.

A study of the effectiveness of various methods for calculating the settings of a PI controller for an automated control system using the example of a hot water supply system at a central heating point. Pp. 36–38.

Sergey V. Guzhov, PhD (Engineering), Associate Professor, “Moscow Power Engineering Institute” National Research University (NRU “MPEI”); **Andrey A. Arbatsky**, PhD (Engineering), General Director of the “Research Institute of Energy-Efficient Microclimate Technologies”, LLC; **Elena V. Krylova**, PhD (Pedagogical), Associate Professor, deputy director for Academic Affairs of the Institute Thermal and Nuclear Power Engineering of the NRU “MPEI”; **Dmitry V. Samusev**, senior instrumentation and control engineer, “Moscow United Energy Company”, PJSC; **Anna O. Sorokina**, student, NRU “MPEI”

1. *O sostoyanii teploenergetiki i tsentralizovannogo teplosnabzheniya v Rossijskoj Federatsii v 2022 godu: informatsionno-analiticheskij doklad* [On the state of thermal power engineering and district heating in the Russian Federation in 2022: Information and analytical report]. *Minenergo Rossii* [Ministry of Energy of Russia]; *Rossiiskoe energeticheskoe agentstvo (FGBU “REA”)* [Russian Energy Agency (“REA” Federal State Budgetary Institution)]. Web-source: minenergo.gov.ru. Access date: January 14, 2026. [In Russian]
2. G.A. Pikina, F.F. Pashchenko, A.F. Pashchenko, A.A. Kosoj. *Reshenie ryada teoretiko-prikladnykh problem variatsionnykh metodov optimal'nogo upravleniya* [Solution of a number of theoretical and applied problems of variational methods of optimal control]. *Datchiki i sistemy* [“Sensors and Systems” Magazine]. 2023. No. 6. Pp. 3–10. [In Russian]
3. E.K. Arakelyan, D.M. Krasnenko. *Kontseptsiya modelirovaniya i proektirovaniya intellektual'nykh izmeritel'nykh datchikov* [Concept of modeling and design of intelligent measuring sensors]. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike* [“New in the Russian Electric Power Industry” Magazine]. 2024. No. 12. Pp. 27–39. [In Russian]
4. F.F. Pashchenko, D.Kh. Chan, E.K. Arakelyan, D.M. Krasnenko. *Adaptivnye algoritmy v zadache modelirovaniya energeticheskikh ob'ektov* [Adaptive algorithms in the problem of modeling energy facilities]. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike* [“New in the Russian Electric Power Industry” Magazine]. 2023. No. 5. Pp. 28–39. [In Russian]
5. I.V. Yakovlev, N.V. Avdokunin, M.V. Gorelov. *Ekonomiya i zatraty energii pri obespechenii teplovykh rezhimov tsentrov obrabotki dannykh, okhlazhdaemykh naruzhnym vozdukhom* [Savings and costs of energy when providing thermal modes of data processing centers cooled by outside air]. *Promyshlennaya energetika* [“Industrial Energy” Magazine]. 2025. No. 1. Pp. 41–49. [In Russian]
6. E.V. Krinitsky, M.D. Zheryagin, A.Yu. Maskinskaya. Prikladnye aspekty koordinatsii tsifrovyykh informatsionnykh modelej inzhenernykh sistem zdaniy v MagiCAD dlya Revit [Applied aspects of coordination of digital information models of engineering systems of buildings in MagiCAD for Revit]. *Zhurnal Santehnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2022. No. 1. Pp. 12–16. [In Russian]
7. *Metod VTI dlya priblizhennogo rascheta optimal'noj nastroyki regul'yatora nagruzki* [The VTI method for approximate calculation of the optimal load regulator setting]. *Fajlovyy arkhiv studentov Studfile* [Studfile Student File Archive]. Web-source: studfile.net. Access date: February 20, 2026. [In Russian]
8. *Staticheskaya nastroyka reguliruyushchikh ustroystv ASR temperatury para nagruzki* [Static tuning of control devices of an automatic load steam temperature regulation system]. *Fajlovyy arkhiv studentov Studfile* [Studfile Student File Archive]. Web-source: studfile.net. Access date: February 20, 2026. [In Russian]
9. *Raschet nastroyek po metodu Koena — Kuna nagruzki* [Calculating load settings using the Cohen-Kuhn method]. *Fajlovyy arkhiv studentov Studfile* [Studfile Student File Archive]. Web-source: studfile.net. Access date: February 20, 2026. [In Russian]
10. S.I. Novikov. *Optimizatsiya avtomaticheskikh sistem regulirovaniya teploenergeticheskogo oborudovaniya: ucheb. posobie* [Optimization of automatic control systems for heat power equipment: A textbook]. Novosibirsk. *Izd-vo NGTU* [Publishing House of Novosibirsk State Technical University]. 2006. Part 1. 108 p. [In Russian]
11. *Ispol'zovanie obratnogo preobrazovaniya Laplasa dlya analiza dinamicheskikh zven'ev sistem upravleniya nagruzki* [Using the inverse Laplace transform to analyze dynamic links of load control systems]. “Habr”; User “Scorobey” of January 10, 2018. Web-source: habr.com. Access date: February 20, 2026. [In Russian]
12. *Ob ustanovlenii na 2024–2028 gody dolgosrochnnykh tarifov na teplovuyu energiyu (moshchnost') i na uslugi po peredache teplovoj energii dlya PAO “MOEK”* [On establishing long-term tariffs for thermal energy (capacity) and thermal energy transmission services for “Moscow United Energy Company”, PJSC, for 2024–2028]. *Prikaz Departamenta ekonomicheskoy politiki i razvitiya g. Moskvy ot 15.12.2023 №DPR-TR-285/23* [Order of the Moscow Department of Economic Policy and Development No. DPR-TR-285/23 of December 15, 2023]. [In Russian]