

УДК 681.51.01

Иносов Сергей Викторович

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов,
orcid.org/0000-0001-8305-5514

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

Бондарчук Ольга Вячеславовна

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов,
orcid.org/0000-0003-1893-1893

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

СВЯЗЬ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ С ДИНАМИКОЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ОБЪЕКТА

Анотація. Дифференцирующий канал общепринятого пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора резко усиливает высокочастотные шумы (в т.ч. погрешности измерения регулируемой величины) и делает этот фактор значимым при расчетах динамики регулирования тепловых объектов (несмотря на малость погрешности измерения температуры). В дифференцирующем канале ПИД регулятора всегда предусматривается фильтрация высокочастотных шумов (так называемое "реальное дифференцирование"), что нужно учитывать при динамических расчетах (но обычно не делается). Рекомендуемая область применения ПИД регулятора ограничивается случаями, когда требуется предельно высокое быстродействие от системы автоматического регулирования и, одновременно, объект регулирования имеет очень малый уровень зашумленности (включая шумы измерения) – не больше 0.1 градуса (при рабочем диапазоне порядка 100 градусов). Во всех остальных случаях следует отключать дифференцирующий канал (использовать ПИ алгоритм регулирования).

Ключові слова: ПИД-регулятор; дифференцирование; регуляризация; погрешности измерения; тепловой объект; динамика регулирования

Постановка проблемы

подавляющее большинство систем автоматического регулирования используются в тепловых технологических процессах [1 – 3]. Основной задачей автоматики является автоматическое поддержание заданной температуры за счет управления нагревом. Как правило, используется принцип регулирования по отклонению от задания, с контуром отрицательной обратной связи. Качество регулирования оценивается по динамическим критериям. Основным является время регулирования, которое следует минимизировать за счет правильного выбора алгоритма регулирования и настройки его параметров.

Тепловые процессы, как объекты регулирования имеют следующие, существенные для выбора регулятора, особенности.

1) Все тепловые объекты регулирования апериодические (т.е. не колебательные). Переходная функция таких объектов (реакция на скачок управляющего воздействия) монотонно возрастает и не содержит колебаний.

2) Тепловые объекты имеют запаздывание, оно

относительно мало в общей инерционности объекта и не является преобладающим. Тем не менее, наличие запаздывания является решающим фактором, ограничивающим предельно достижимое качество регулирования.

3) Уровень зашумленности тепловых объектов весьма мал. Тепловая инерционность сглаживает колебания регулируемой величины. Точность измерения регулируемой величины (как правило, это температура) относительно высока.

В регулирующих микроконтроллерах обычно используется Пропорционально-Интегрально-Дифференциальный (ПИД) алгоритм регулирования, поскольку он близок к теоретически достижимому идеалу для реальных тепловых объектов с перечисленными особенностями [4; 5].

Наличие в ПИД-регуляторе дифференцирующего канала, резко усиливающего высокочастотные помехи (в т.ч. погрешности измерения регулируемой величины), порождает ряд метрологических проблем. С одной стороны, предъявляются очень жесткие требования к точности измерения регулируемой величины (температуры); с другой стороны, даже при погрешности измерения порядка 0.1 градуса, качество регулирования резко

ухудшається (по порівнянню з ідеальним розрахунковим випадком відсутності шумів вимірювання). Вказані проблеми і являються предметом дослідження в даній роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На рис. 1 приведена типова розрахункова структурна схема (модель) динаміки регулювання по відхиленню, з контуром від'ємної зворотної зв'язі. Контур регулювання включає об'єкт регулювання з передаточною функцією $W_0(p)$ і регулятор з передаточною функцією $W_1(p)$.

Передаточні функції на базі преобразовання Лапласа являються математичними моделями, якими традиційно описують динамічні властивості лінійних інерційних стаціонарних об'єктів [1 – 3].

Регульовувана величина (температура в градусах) порівнюється з заданим і виходиться розбіжність. В залежності від розбіжності регулятор коректує керуючий вплив (потужність нагріву в % від номіналу). Вхідними впливами являються зміни завдання або зовнішніх впливів. Як правило, при динамічних розрахунках вважається, що завдання або вплив змінюються стрибком.

Якщо задані передаточні функції об'єкта і регулятора, модель дозволяє розрахувати перехідні процеси (аналітично, з допомогою операційного числення, або частотними методами, або чисельним моделюванням в часовій області). Вихідними змінними являються регульовувана величина і розбіжність.

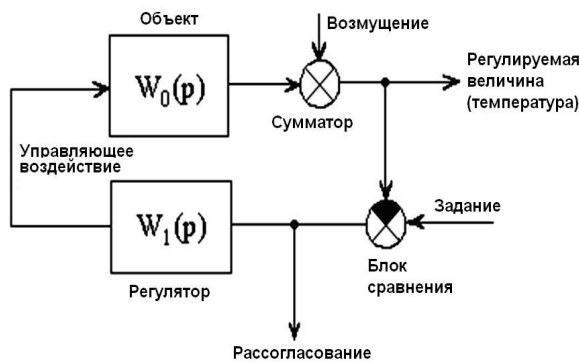


Рисунок 1 – Розрахункова структурна схема динаміки регулювання

Типова передаточна функція теплового об'єкта має вигляд [4; 5]:

$$W_0(p) = \frac{K \cdot e^{-p \cdot T_3}}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}, \quad (1)$$

де K – статичкий коефіцієнт передачі об'єкта, T_3 – час затримки; T_1, T_2 – перша і друга

постійні часи об'єкта; p – комплексний аргумент. Для розглянутого прикладу:

$$K = 1.5 \text{ град./\%}, T_1 = 1000 \text{ с}, T_2 = 400 \text{ с}, T_3 = 50 \text{ с}.$$

Передаточну функцію можна інтерпретувати як формульне представлення амплітудо-фазо-частотної характеристики (АФЧХ) об'єкта, т.е. залежності комплексного коефіцієнта посилення від кругової частоти ω , де $p = j\omega$ (j – мнимий одиниця). АФЧХ визначає залежність виходу (температури) об'єкта від входу (потужності нагріву) при використанні частотних спектральних методів розрахунку.

Приведена модель об'єкта (1) може вважатися універсальною, придатною для розрахунку динаміки регулювання будь-яких теплових об'єктів, так як вона враховує всі суттєві особливості таких об'єктів: статизм, наявність аперіодических інерційностей (враховуються дві основні з постійними часами T_1 і T_2) і наявність затримки $e^{-p \cdot T_3}$, яке відносно мало в загальній інерційності об'єкта, але сильно впливає на якість регулювання. Навіть якщо об'єкт не має «транспортного» затримки, передаточна функція $e^{-p \cdot T_3}$ інтегрально враховує всі малі інерційності, не враховані двома основними постійними часами.

В підручниках, як правило, наводиться ідеальна (не регульована) передаточна функція ПІД-регулятора, зв'язуюча розбіжність з керуючим впливом:

$$W_1(p) = K_p \cdot \left(T_d \cdot p + 1 + \frac{1}{T_i p} \right) \quad (2)$$

Основні параметри налаштування ПІД-регулятора: K_p – коефіцієнт пропорційності; T_i – постійна часу інтегрування; T_d – постійна часу диференціювання. Їм повинні бути присвоєні чисельні значення, оптимальні для заданого об'єкта регулювання (т.н. «налаштування» регулятора).

Рекомендуються наступні формули для спрощеної (передварильної) налаштування параметрів ПІД-регулятора в залежності від відомих параметрів об'єкта регулювання: [4]

– коефіцієнт пропорційності

$$K_p = 0.4 \frac{T_1 + T_2}{K \cdot T_3}; \quad (3)$$

– постійна часу диференціювання

$$T_d = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2}; \quad (4)$$

– постійна часу інтегрування

$$T_i = T_1 + T_2. \quad (5)$$

Формули отримані з умови мінімальності часу регулювання.

Для рассматриваемого примера:

$$K_p = 9\%/град, T_i = 1400 \text{ с}, T_d = 286 \text{ с},$$

$$W_1(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right). \quad (7)$$

Цель статьи

В идеальном виде передаточная функция (2) физически нереализуема, так как усиление шумов, которые всегда присутствуют, стремится к бесконечности на высоких частотах в дифференцирующем канале. На рис. 2 приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) идеального ПИД-регулятора (точечный график). ЛАЧХ показывает, как усиление зависит от частоты. Расчет выполнен с помощью программного средства Маткад.

Подставляем $j\omega$ (ω – круговая частота; j – мнимая единица) вместо p в передаточную функцию, вычисляем модуль результата, строим график в логарифмических координатах. Это и будет ЛАЧХ.

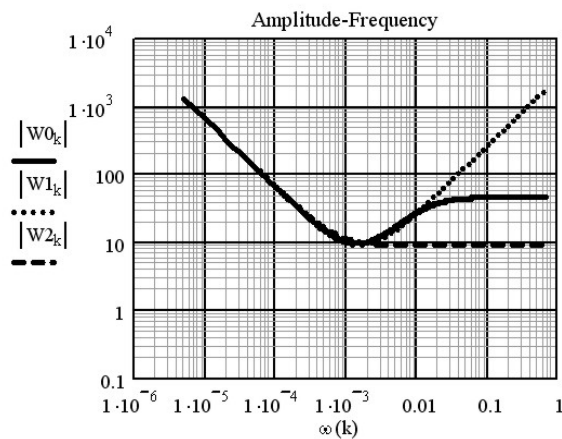


Рисунок 2 – Логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) идеального ПИД-регулятора (точечный график), реального ПИД-регулятора (сплошная линия) и ПИ-регулятора (пунктир)

Для ограничения усиления дифференцирующего канала на высоких частотах (регуляризации ПИД-регулятора) в него вводится аperiодическое звено с постоянной времени τ . Она меньше, чем основные постоянные времени T_i, T_d . Для рассматриваемого примера $\tau = 71 \text{ с}$. Соотношение T_d/τ – определяет коэффициент усиления высоких частот.

Передаточная функция реального ПИД-регулятора имеет вид:

$$W_1(p) = K_p \cdot \left(\frac{T_d \cdot p}{\tau \cdot p + 1} + 1 + \frac{1}{T_i p} \right). \quad (6)$$

На рис. 2 приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) реального ПИД-регулятора (сплошная линия). Усиление на высоких частотах ограничено.

Если объект регулирования сильно зашумлен, то дифференцирующий канал вообще отключается. В результате получим ПИ-регулятор с передаточной функцией:

ПИД-регулятора, когда $T_d = 0$.

На рис. 2 приведена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) ПИ-регулятора (пунктир). Усиление на высоких частотах отсутствует.

Несмотря на малость погрешности измерения температуры (порядка 0.1 градуса), дифференцирующий канал ПИД-регулятора резко усиливает шумы измерения и делает этот фактор значимым, даже при наличии подавления высокочастотных шумов. Целью является исследование взаимодействия реальных погрешностей измерения температуры с реальным дифференцирующим каналом ПИД-регулятора и их совместного влияния на качество регулирования температуры.

Изложение основного материала

Исследование проводилось путем компьютерного моделирования динамики регулирования в реальном времени в среде программирования VisSim (Visual Simulation). На рис. 3, 4, 5 приведены иллюстрирующие копии экрана.

На рис. 3 приведена расчетная модель реального ПИД-регулятора с учетом погрешностей измерения температуры, неидеальностью дифференцирования и ограничением управляющего воздействия. Модель погрешности измерения включает добавку «белого шума» (среднеквадратичное значение 0.02 град.) и квантование по уровню (порог квантования 0.2 град.). ПИД-регулятор имеет три параллельных канала – интегрирующий, пропорциональный и дифференцирующий. VisSim использует букву s (вместо традиционной буквы p) для обозначения комплексного аргумента передаточных функций

Управляющее воздействие ограничивается диапазоном 0 – 100%.

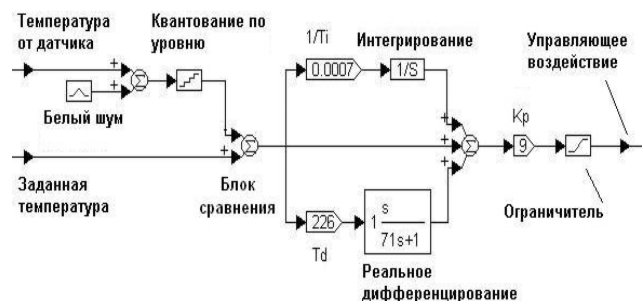


Рисунок 3 – Расчетная модель реального ПИД-регулятора с учетом погрешностей измерения температуры, неидеальностью дифференцирования и ограничением управляющего воздействия

Рис. 4 иллюстрирует динамику системы автоматического регулирования температуры с вышеописанным реальным ПИД-регулятором. Модель объекта регулирования Plant реализует вышеописанную передаточную функцию $W_0(p)$. Нумерация графиков: 1 – заданная температура; 2 – фактическая температура; 3 – управляющее воздействие. Задание увеличивается скачком на 30 градусов, а потом еще раз увеличивается на 10 градусов. Численные значения параметров настройки ПИД-регулятора выбраны из условия минимума времени регулирования.

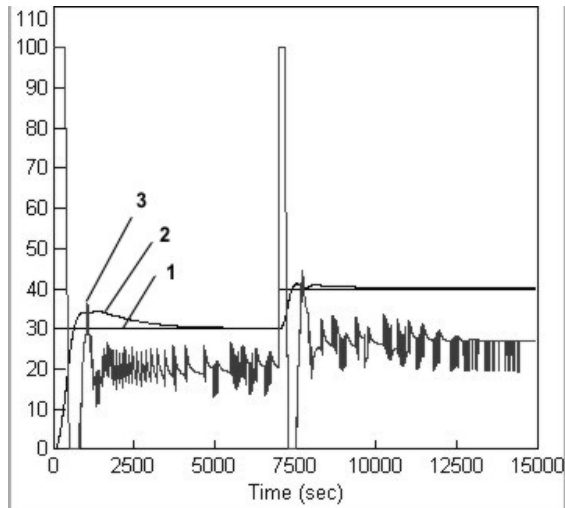


Рисунок 4 – Динамика системы автоматического регулирования температуры с реальным ПИД-регулятором с учетом погрешностей измерения температуры: 1 – заданная температура; 2 – фактическая температура; 3 – управляющее воздействие

Хотя погрешность измерения температуры ничтожно мала (среднеквадратичная погрешность 0.15 градуса) и незаметна на графике 2, она усиливается дифференцирующим каналом регулятора и приводит к недопустимо большой зашумленности управляющего воздействия 3 (порядка 10 – 15%). Кроме того, при изменениях задания наблюдаются чрезмерно сильные манипуляции управляющим воздействием (от 0 до 100% и обратно). Это уменьшает ресурс работы исполнительного механизма и управляющего органа.

Рис. 5 иллюстрирует динамику системы автоматического регулирования температуры с ПИ-регулятором (частный случай настройки ПИД-регулятора, когда постоянная времени дифференцирования T_d равна нулю). Нумерация графиков: 1 – заданная температура; 2 – фактическая температура; 3 – управляющее воздействие. Численные значения параметров настройки ПИ-регулятора выбраны из условия минимума времени регулирования.

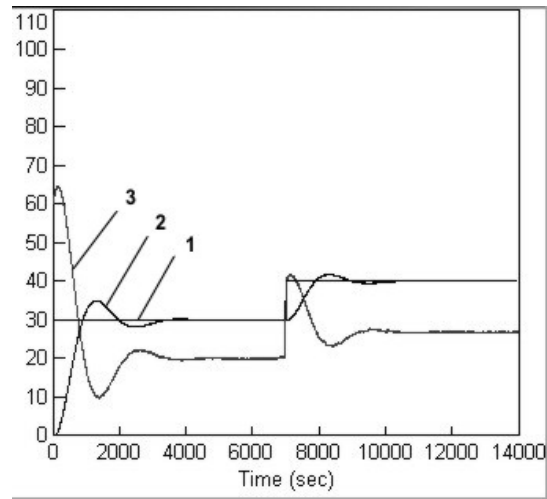


Рисунок 5 – Динамика системы автоматического регулирования температуры с ПИ-регулятором: 1 – заданная температура; 2 – фактическая температура; 3 – управляющее воздействие

Зашумленность управляющего воздействия ничтожно мала. Режим использования исполнительного при резких изменениях задания щадящий. Это увеличивает ресурс работы исполнительного механизма и управляющего органа. Однако, по сравнению с ПИД-регулятором, время регулирования увеличивается в 1.5 – 2 раза.

Выводы

1. Базовым промышленным алгоритмом регулирования является Пропорционально-Интегрально-Дифференциальный (ПИД-регулятор). Частный случай – случай настройки ПИД-регулятора, когда постоянная времени дифференцирования равна нулю (дифференцирующий канал отключен), называется ПИ-регулятор.

2. ПИД-регулятор следует применять только при одновременном выполнении двух условий:

- объект регулирования имеет очень малый уровень высокочастотных шумов (включая шумы измерения и наводки) – не больше 0.1 градуса (при рабочем диапазоне порядка 100 градусов);
- если требуется предельно высокое быстродействие от системы автоматического регулирования.

Во всех остальных случаях следует использовать ПИ-регулятор.

3. Преимуществом ПИД-регулятора является меньшее время регулирования (в 1.5 – 2 раза). Недостатком является существенная зашумленность управляющего воздействия и чрезмерно интенсивные манипуляции управляющим воздействием. Это уменьшает ресурс работы исполнительного механизма и управляющего органа.

4. Преимуществом ПИ-регулятора является щадящий режим использования исполнительного

механізму. Недостаток – несколько большее время регулювання (в 1.5 – 2 раза).

5. В дифференцирующем канале ПИД-регулятора обязательно предусматривается подавление высокочастотных шумов (так называемое "реальное дифференцирование"), что нужно учитывать при динамических расчетах (но обычно не делается). Идеальное дифференцирование (обычно используемое в расчетах) физически нереализуемо, так как коэффициент усиления

высокочастотных шумов (в т.ч. шумов измерения) стремится к бесконечности. При реальной погрешности измерения температуры порядка 0.1 градуса, коэффициент усиления высокочастотных шумов не должен превышать значения 3 – 4. При этом расчетное быстродействие системы автоматического регулювання оказывается существенно меньше, чем для идеального расчетного варианта.

Список литературы

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – К.: Либідь, 2007. – 656 с..
2. Ладанюк А.П., Архангельська К.С. Теорія автоматичного керування (частина I): Конспект лекцій. – К.: НУХТ, 2007. – 102 с.
3. Абраменко І.Г., Абраменко Д.І. Теорія автоматичного керування: Конспект лекцій. – Х.: ХНАМГ, 2008. – 178 с.
4. Иносов С.В., Корниенко В.М. Оптимизация алгоритма автоматического регулювання тепловыми процессами. *Управління розвитком складних систем.* – № 13. – 2013. – С. 104 – 108.
5. Иносов С.В., Корниенко В.М., Гречуха В.В. Алгоритм автонастройки пропорционально-интегрального регулятора с использованием бигармонического пробного возмущения. *Управління розвитком складних систем.* – 2014. – № 19. – С. 104-108.
6. Плескунов М. А. *Операционное исчисление: учебное пособие.* – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. – 141 с.
7. Изерман Р., *Цифровые системы управления.* – М.: МИР, 1984. – 541 с.
8. Поляков К.Ю. *Основы теории цифровых систем управления: учебное пособие.* – С.Петербург: Издательский центр СПбГМТУ, 2006. – 162 с.
9. Зімчук І.В., Іщенко В.І., Канкін І.О. Синтез алгоритмів цифрового управління для автоматичних слідувальних систем // *Системні дослідження та інформаційні технології.* – № 1. – 2015.
10. Иносов С.В. Калькулятор алгебры решетчатых функций. Труды 15-й международной конференции по автоматическому управлению «АВТОМАТИКА-2008». Одесская национальная морская академия. 2008, – 232 с.
11. Остром К., Виттенмарк Б. *Системы управления с ЭВМ.* – М.: МИР, 198., – 480 с.

Статья поступила в редколлегию 10.09.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.В. Мыслович, заведующий научным отделом Института электродинамики НАН Украины, Киев.

Иносов Сергій Вікторович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів, orcid.org/0000-0001-8305-5514
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Бондарчук Ольга Вячеславовна

Кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів, orcid.org/0000-0003-1893-1893
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ЗВ'ЯЗОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ З ДИНАМІКОЮ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО ОБ'ЄКТА

Анотація. Диференціюючий канал пропорційно-інтегрально-диференціюючого (ПІД) регулятора різко підсилює высокочастотні шуми (в т.ч., похибки вимірювання величини, що регулюється) і робить цей фактор значущим при розрахунках динаміки регулювання теплових об'єктів (незважаючи на малу похибку вимірювання температури). В диференціюючому каналі ПІД регулятора завжди передбачається фільтрація высокочастотних шумів (так зване "реальне диференціювання"), що треба враховувати при динамічних розрахунках (але зазвичай не робиться). Область використання ПІД регулятора, що рекомендується, обмежується випадками, коли вимагається максимально висока швидкість від системи автоматичного регулювання і, водночас, об'єкт регулювання має дуже малий рівень зашумленості (включаючи шуми вимірювання) – не більше 0.1 градуса (при робочому діапазоні порядку 100 градусів). У всіх інших випадках треба відключити диференціюючий канал (використовувати ПІ алгоритм регулювання).

Ключові слова: ПІД-регулятор; диференціювання; регуляризація; похибки вимірювання; тепловий об'єкт; динаміка регулювання

Inosov Sergei

PhD, Associate professor, Department of Process Automation, *orcid.org/0000-0001-8305-5514*
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

Bondarchuk Olga

PhD, Associate professor, Department of Process Automation, *orcid.org/0000-0003-1893-1893*
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

**RELATION BETWEEN TEMPERATURE MEASUREMENT ERROR WITH
REGULATION DYNAMICS OF A THERMAL PLANT**

Abstract. Differentiating channel of a conventional proportional-integrating-differentiating (PID) controller significantly increases high frequency noise, (including controlled variable measurement errors) making this a significant factor when calculating regulation dynamics of thermal plants (despite insignificance of temperature measurement error). The differentiating channel of PID controller always provides filtering of high-frequency noise (so-called "real differentiation"), which is to be taken into consideration, when calculating regulation dynamics of automatic control (but usually is not). Recommended application field for PID-controller is limited to cases, where maximal speed of reaction is required from the automatic control system and, simultaneously, the plant has a very low noise level (including measurement noise) - not more than 0.1 degree (at an operating range of about 100 degrees). In all other cases, the differentiating channel should be disabled (PID control algorithm converts into PI control algorithm). The advantage of PID controller is shorter regulation time (1.5 – 2 times). The disadvantage is significant noisiness and excessively intensive manipulation of the control action. This reduces the life-time of the actuator.

Keywords: PID controller; differentiation; regularization; measurement error; thermal plant; regulation dynamics

References

1. Popovich, M.G., Kovalchuk, V.A. (2007). *Theory of automatic control: Textbook*. K.: Lybid, 656.
2. Ladaniuc, A.P., Arkhangelskaya, K.S. (2007). *Theory of automatic control (part 1): Abstract of lectures*. Kiev: KNUCA, 102.
3. Abramenko, G.I., Abramenko, D.I. (2008). *Theory of automatic control: the Abstract of lectures*. Kharkov: HNAMEG, 178.
4. Inosov, S.V., Kornienko, V.M. (2013). *Optimization of the algorithm for automatic control of thermal processes*. *Management of development of complex systems*, 13, 104 – 108.
5. Inosov, S.V., Kornienko, V.M., Grechucha, V.V. (2014). *An adaptation algorithm for proportional-integral action controller with biharmonic trial disturbance*. *Management of development of complex systems*, 19, 104 – 108
6. Pleskunov, M.A. (2014). *Operational calculus: a tutorial*. Ekaterinburg. Publishing house of the Ural University, 141.
7. Isermann, R. (1984). *Digital control systems*. Moscow, MIR, 541.
8. Polyakov, K. (2006). *Basic theory of digital control systems. Textbook..* St. Petersburg. Publishing center SPBGMTU, 162.
9. Zimchuk, I.V., Ishchenko, V.I., Kankin, I.O. (2015). *Synthesis of algorithms of digital control for automatic tracking systems*. *System research and information technologies*, 1, 32 – 38.
10. Inosov, S.V. (2008). *Calculator for algebra of sampled functions*. *Proceedings of the 15th international conference on automatic control "AUTOMATION-2008"*. Odessa national Maritime Academy, 232.
11. Astrom, K. & Wittenmark, B. (1987). *Computer controlled systems*. Moscow, MIR, 480.

Ссылка на публикацию

- APA Inosov, Sergei & Bondarchuk, Olga. (2018). *Relation between temperature measurement error with regulation dynamics of a thermal plant*. *Management of development of complex system*, 35, 162 – 167 [in Russian].
- ГОСТ Иносов С.В. Связь ошибок измерения температуры с динамикой регулирования теплового объекта [Текст] / С.В Иносов, О.В Бондарчук // *Управление развитием сложных систем*. – 2018. – № 35. – С. 162 – 167.