

УДК 681.51.01

Иносков Сергей Викторович

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

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

Самойленко Николай Иванович

Ассистент кафедры автоматизации технологических процессов, orcid.org/0000-0003-1893-1893

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЦИФРОВОГО АЛГОРИТМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С БОЛЬШИМ ШАГОМ КВАНТОВАНИЯ ВО ВРЕМЕНИ

Аннотация. Установлено, что в системе цифрового автоматического регулирования температуры для уменьшения износа исполнительного механизма целесообразно выбирать большой шаг квантования во времени, соизмеримый с временем регулирования. В указанном случае традиционный ПИД-алгоритм регулирования неприменим. Для данного случая разработан универсальный алгоритм регулирования методами дискретного операционного исчисления на основе z-преобразования с конечным временем переходного процесса в виде дискретной передаточной функции третьего порядка. Разработанный алгоритм применим для большинства тепловых объектов и обеспечивает время регулирования, равное 2 – 3 тактам работы регулятора.

Ключевые слова: синтез; динамика; алгоритм регулирования; дискретное время; тепловой объект; шаг квантования

Постановка проблемы

Системы автоматического регулирования используются для поддержания на заданном уровне каких-либо технологических параметров (например, регулирование температуры за счет управления мощностью нагрева) [1 – 3]. 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. Алгоритм регулирования на современном этапе реализуется программно в микроконтроллере. Обычно используется Пропорционально-Интегрально-Дифференциальный (ПИД) алгоритм регулирования, потому что он близок к теоретически достижимому идеалу для реальных тепловых объектов и его дальнейшее усовершенствование невозможно [4; 5]. В случае ПИД-регулятора шаг квантования времени должен быть малым (по сравнению с временем регулирования), и динамический расчет настройки регулятора можно выполнять для непрерывного времени (эффекты квантования времени пренебрежимо малы), традиционными методами

теории автоматического регулирования – операционное исчисление на основе преобразования Лапласа, частотные методы на базе преобразования Фурье [6]. Указанные методы применимы при условии линейности и стационарности объекта регулирования и регулятора. Как правило, эти условия выполняются.

Но бывают случаи, когда выгодно выбрать большой шаг квантования времени и использовать преимущества регулирования именно в дискретном времени. При этом переходный процесс регулирования заканчивается всего за 2 – 3 такта работы регулятора. Такой регулятор будем называть регулятором с конечным временем регулирования. Манипуляции управляющим воздействием в этом случае оказываются минимальными, что резко уменьшает износ исполнительного механизма. Дополнительным преимуществом является снижение количества вычислений и времени работы процессора.

Важной для динамических расчетов особенностью цифрового регулирования является его нестационарность. Циклично во времени осуществляется выборка информации от датчика. Выборка – это нестационарная операция превращения непрерывного сигнала в выборочную последовательность значений. При выдаче управляющего воздействия осуществляется обратная операция превращения вычисленной регулятором

последовательности значений в непрерывный сигнал. Эта операция (также нестационарная) называется фиксацией, так как на протяжении такта фиксируется последнее выданное значение.

В данном случае нельзя пренебрегать нестационарными эффектами квантования во времени, так как специально исследуется случай большого шага квантования, соизмеримого с длительностью переходных процессов. При этом динамические расчеты в непрерывном времени (особенно задача синтеза алгоритма регулирования) резко усложняются.

Указанная проблема снимается за счет перехода к динамическим расчетам в квантованном (дискретном) времени. Принимается, что время может быть только целым числом (количество тактов работы цифрового регулятора). При таком подходе условие стационарности выполняется и можно использовать дискретное операционное исчисление на основе z-преобразования [7 – 9] для синтеза алгоритма регулирования (ПИД-алгоритм в этом варианте неприменим). Соответствующий математический аппарат составляет основу теории цифрового автоматического регулирования [10; 11].

Анализ последних исследований и публикаций

В одной из предыдущих публикаций [12] получена универсальная модель динамики теплового объекта регулирования в квантованном времени в виде дискретной передаточной функции $W_0(z^{-1})$ на основе z-преобразования. Дискретная передаточная функция описывает (в динамике) зависимость температуры (регулируемая величина) от нагрева (управляющее воздействие) с учетом эффектов квантования во времени. Полученная линейная стационарная модель в дискретном времени является точной, а не приближенной, даже если шаг квантования времени не является малым по сравнению с временем регулирования. Дискретная передаточная функция теплового объекта регулирования имеет вид:

$$W_0(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{B(z^{-1})}{1 + A(z^{-1})}, \quad (1)$$

где a_1, a_2, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты знаменателя передаточной функции объекта; z^{-1} – единичное запаздывание (оператор задержки сигнала на один такт); $B(z^{-1}), A(z^{-1})$ – полиномы числителя и знаменателя соответственно. Значения коэффициентов b_1, b_2, b_3, a_1, a_2 предполагаем известными и заданными. Для конкретного теплового объекта регулирования они могут быть получены, например, из эксперимента методами идентификации, или вычислены, если известны основные параметры объекта в непрерывном

времени – статический коэффициент передачи K , первые две постоянные времени T_1, T_2 , время запаздывания T_3 , шаг квантования во времени [12]. Предполагается, что $T_1 > T_2 > T_3$.

Цель статьи

Полученная ранее универсальная линейная стационарная модель теплового объекта регулирования в дискретном времени $W_0(z^{-1})$ используется для синтеза универсального регулятора с конечным временем регулирования для тепловых объектов методами дискретного операционного исчисления на основе z-преобразования [7 – 9].

Изложение основного материала

В общем виде передаточная функция регулятора с конечным временем регулирования определяется по формуле [7]:

$$W_1(z^{-1}) = \frac{1 + \frac{A(z^{-1})}{\Sigma}}{1 - \frac{B(z^{-1})}{\Sigma}}, \quad (2)$$

где $B(z^{-1}), A(z^{-1})$ – полиномы числителя и знаменателя передаточной функции объекта соответственно; Σ – сумма коэффициентов числителя передаточной функции объекта

$$\Sigma = b_1 + b_2 + b_3 + \dots \quad (3)$$

Для конкретного случая модели объекта регулирования третьего порядка получим передаточную функцию регулятора в виде:

$$W_1(z^{-1}) = \frac{1 + \frac{A(z^{-1})}{\Sigma}}{1 - \frac{B(z^{-1})}{\Sigma}} = \frac{\frac{1}{\Sigma} + \frac{a_1}{\Sigma} z^{-1} + \frac{a_2}{\Sigma} z^{-2}}{1 - \frac{b_1}{\Sigma} z^{-1} - \frac{b_2}{\Sigma} z^{-2} - \frac{b_3}{\Sigma} z^{-3}} = \frac{c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3}}, \quad (4)$$

где c_0, c_1, c_2 – коэффициенты числителя; d_1, d_2, d_3 – коэффициенты знаменателя передаточной функции регулятора.

Дискретная передаточная функция определяет алгоритм линейного стационарного преобразования входного цифрового сигнала в выходной цифровой сигнал. Цифровые сигналы представляют собой потоки действительных чисел (выборочных значений соответствующих непрерывный сигналов). В случае регулятора входным сигналом является отклонение фактической температуры от задания (в

градусах), а выходным сигналом является управляющее воздействие (мощность нагрева в % от номинала).

Таким образом, синтезирован алгоритм цифрового регулирования температуры с конечным временем переходного процесса для универсальной модели теплового объекта регулирования. Искомая передаточная функция регулятора имеет третий порядок, а ее коэффициенты $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ вычисляются по формуле (4) через известные параметры объекта b_1, b_2, b_3, a_1, a_2 . Последние, в свою очередь, могут быть вычислены, если известны основные параметры объекта в непрерывном времени – статический коэффициент передачи K , первые две постоянные времени T_1, T_2 , время запаздывания T_3 , шаг квантования во времени τ [12].

Проверочный анализ выполним путем моделирования динамики регулирования в программной среде VisSim (Visual Simulation).

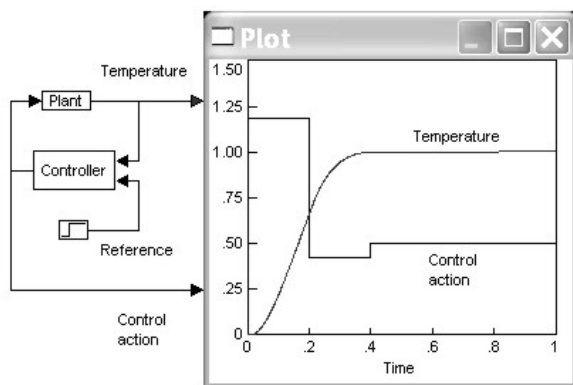


Рисунок 1 – Модель системы автоматического регулирования

Структурная схема модели системы автоматического регулирования по отклонению (рис. 1) представляет собой контур отрицательной обратной связи, включающий объект регулирования (Plant) и цифровой регулятор (Controller). Регулируемой величиной является температура (Temperature) в градусах, управляющим воздействием (Control action) является мощность нагрева в % от номинала. Регулятор сравнивает температуру с заданной (Reference) и, в зависимости от рассогласования, корректирует нагрев. Входным возмущением является единичный скачок задания. Осциллограф (Plot) отображает графики изменения температуры и управляющего воздействия в переходном процессе. Время (Time) указано в часах. Переходной процесс действительно полностью заканчивается всего за два такта работы регулятора. Это характерная особенность регулирования именно в дискретном времени (для регулирования в непрерывном времени типично асимптотическое затухание переходного процесса).

Внутренняя структура модели объекта Plant приведена на рис. 2. Модель функционирует в непрерывном времени и использует традиционные элементарные динамические блоки: блок запаздывания, два аperiodических блока, усилительный блок (слева направо). Внутри блоков указаны соответствующие передаточные функции по Лапласу для непрерывного времени. Модель учитывает статический коэффициент передачи $K=2$ град, первые две постоянные времени $T_1 = 0.3$ ч, $T_2 = 0.1$ ч, время запаздывания $T_3 = 0.01$ ч. Эта модель универсальна и пригодна для большинства тепловых объектов регулирования (с соответствующими численными значениями параметров) [12].

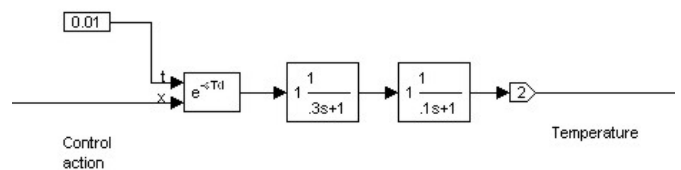


Рисунок 2 – Внутренняя структура модели теплового объекта регулирования

Внутренняя структура модели регулятора Controller приведена на рис. 3. Рассогласование (Error) вычисляется путем сравнения температуры с заданием (сумматор обозначается как Σ).

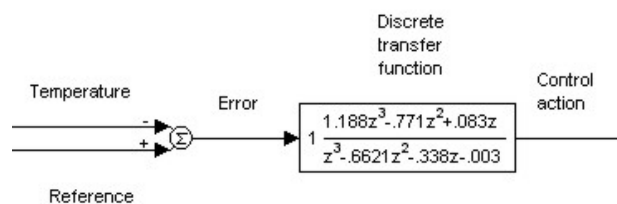


Рисунок 3 – Внутренняя структура модели регулятора

Управляющее воздействие Control action (в % от номинала) вычисляется путем пропускания рассогласования Error через блок дискретной передаточной функции (Discrete transfer function). Этот блок функционирует в дискретном времени (учитывает квантование во времени с шагом $\tau = 0.2$ ч) и реализует дискретную передаточную функцию регулятора $W_1(z^{-1})$, полученную ранее. Численные значения коэффициентов рассчитаны по формуле (4). Примечание: в программной среде VisSim в дискретных передаточных функциях используются положительная степень z в отличие от традиционной отрицательной z^{-1} . Переход от одной формы записи к другой сводится к умножению (делению) числителя и знаменателя на z^3 . Численные значения коэффициентов при этом не меняются.

Структурная конечно-разностная схема алгоритма регулирования, иллюстрирующая программную реализацию его в регулирующем микроконтроллере, приведена на рис. 4. Блок,

обозначенный z^{-1} – это единичное запаздывание (оператор задержки сигнала на один такт). Перечеркнутые кружочки обозначают сумматоры сигналов. Зачерненный сектор в сумматоре обозначает инверсию (изменение знака). Остальные блоки усилительные (умножение сигнала на коэффициент). Стрелки показывают направление причинно-следственных зависимостей. Числитель передаточной функции регулятора (4) соответствует нерекурсивной части регулирующего алгоритма. Цифровой сигнал проходит на выход параллельно, с различными запаздываниями (от 0 до 2 тактов), и соответствующими весовыми коэффициентами (c_0, c_1, c_2). Знаменатель передаточной функции (4) соответствует рекурсивной части регулирующего алгоритма. В алгоритме имеются отрицательные обратные связи с различными запаздываниями (1, 2 и 3 такта) и соответствующими весовыми коэффициентами (d_1, d_2 и d_3).

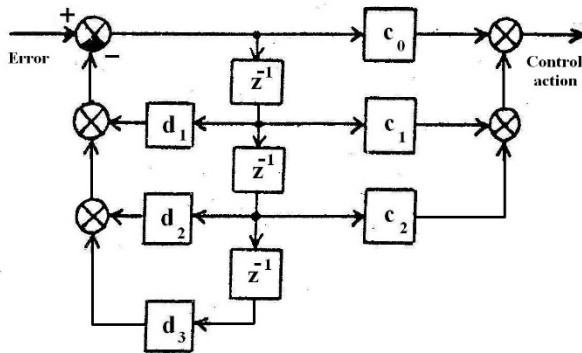


Рисунок 4 – Структурная конечно-разностная схема алгоритма регулирования

Таким образом, синтезирован универсальный алгоритм регулирования в виде дискретной передаточной функции и соответствующей структурной конечно-разностной схемы методами дискретного операционного исчисления на основе z -преобразования. Синтезированный алгоритм регулирования применим для большинства тепловых объектов и обеспечивает время регулирования, равное 2 – 3 тактам работы регулятора. Настройка регулятора под конкретный объект регулирования сводится к заданию численных значений коэффициентов $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ дискретной передаточной функции регулятора. Эти численные значения параметров настройки могут быть вычислены, если известны основные динамические параметры объекта регулирования в непрерывном времени – статический коэффициент передачи K , первые две постоянные времени T_1, T_2 , время запаздывания T_3 , а также выбран шаг квантования во времени τ .

Имеется возможность уменьшать время регулирования за счет уменьшения шага квантования τ , однако при этом резко усиливается форсировка

управляющего воздействия. В качестве иллюстрации на рис. 5 приведен переходной процесс для уменьшенного в два раза (до 0.1 ч) шага квантования τ . Естественно, что параметры настройки регулятора $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ при этом были пересчитаны заново.

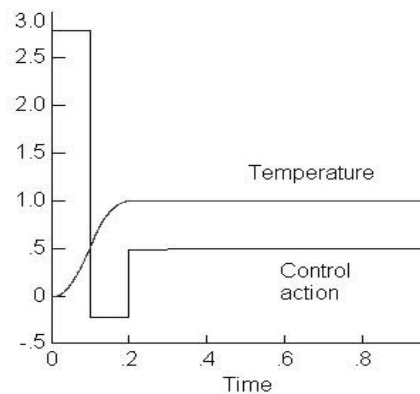


Рисунок 5 – Переходной процесс в системе автоматического регулирования для уменьшенного в два раза шага квантования во времени

Время регулирования действительно уменьшилось в два раза (с 0.4 ч до 0.2 ч), по сравнению с рис. 1. Однако при этом размах манипуляций управляющим воздействием (Control action) увеличился в четыре раза и зашел в область отрицательных значений, что уже нежелательно. Рекомендуемое значение τ составляет 0.4 – 0.8 от основной постоянной времени объекта T_1 .

Рис. 6 иллюстрирует особенности программного регулирования температуры по заданному графику. График температуры (Temperature) полностью соответствует графику задания (Reference), но с неизбежным запаздыванием (в данном примере на 1.3 такта), что несущественно при программном регулировании. Процесс подъема температуры на 80 градусов за два часа потребовал всего 10 манипуляций управляющим воздействием (Control action) при шаге квантования во времени $\tau = 0.2$ ч.

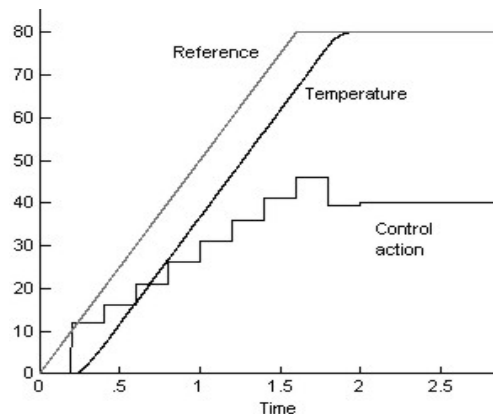


Рисунок 6 – График программного подъема температуры

Выводы

1. В системе цифрового автоматического регулирования температуры для резкого уменьшения износа исполнительного механизма целесообразно выбирать большой шаг квантования во времени, чтобы переходный процесс регулирования заканчивался за несколько тактов.

2. В указанном случае традиционный ПИД-алгоритм регулирования неприменим.

3. Для указанного случая синтезирован универсальный алгоритм регулирования с конечным временем переходного процесса в виде дискретной передаточной функции третьего порядка методами дискретного операционного исчисления на основе z-преобразования.

4. Синтезированный алгоритм регулирования применим для большинства тепловых объектов и

обеспечивает время регулирования, равное 2 – 3 тактам работы регулятора.

5. Настройка регулятора под конкретный объект регулирования сводится к заданию численных значений шести коэффициентов дискретной передаточной функции регулятора. Эти численные значения параметров настройки могут быть рассчитаны по приведенным формулам, если известны основные динамические параметры объекта регулирования в непрерывном времени – статический коэффициент передачи, первые две постоянные времени, время запаздывания, а также, выбран шаг квантования во времени.

6. Шаг квантования во времени рекомендуется выбирать в диапазоне значений 0,4 – 0,8 от основной постоянной времени объекта.

Список литературы

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: підручник. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
2. Ладанюк А.Л., Архангельська К.С. Теорія автоматичного керування (Ч. I): конспект лекцій. – К.: НУХТ, 2007. – 102 с.
3. Абраменко І.Г., Абраменко Д.І. Теорія автоматичного керування: конспект лекцій. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 178 с.
4. Иносов С.В., Корниенко В.М. Оптимизация алгоритма автоматического регулирования тепловыми процессами. *Управління розвитком складних систем.* – 2013. – № 13 – 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. Изд-во Уральского ун-та, 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 слідкувальних систем. // *Системні дослідження та інформаційні технології* – 2015. № 1.
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. Острем К., Виттенмарк Б. *Системы управления с ЭВМ.* М.: МИР, 1987. – 480 с.
12. Иносов С.В., Бондарчук О.В. Дискретизация динамической модели теплового объекта регулирования с большим шагом квантования во времени // *Управління розвитком складних систем.* – № 31, 2017. – С. 190 – 195.

Статья поступила в редакцию 22.10.2018

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

Самойленко Микола Іванович

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

СИНТЕЗ І АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЦИФРОВОГО АЛГОРИТМУ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА З ВЕЛИКИМ КРОКОМ КВАНТУВАННЯ В ЧАСІ

Анотація. Визначено, що в системі цифрового автоматичного регулювання температури для зменшення зносу виконавчого механізму доцільно вибирати великий крок квантування в часі, зіставний з часом регулювання. У вказаному випадку традиційний ПІД-алгоритм регулювання непридатний. Для вказаного випадку синтезовано універсальний

алгоритм регулювання з обмеженим часом перехідного процесу у вигляді дискретної передаточної функції третього порядку методами дискретного операційного зчислення на основі z-перетворення. Синтезований алгоритм регулювання придатний для більшості теплових об'єктів і забезпечує час регулювання, що дорівнює 2 – 3 тактам функціонування регулятора.

Ключові слова: синтез; динаміка; алгоритм регулювання; дискретний час, тепловий об'єкт, крок квантування

Inosov Sergei

Associate professor, Department of Process Automation, orcid.org/0000-0001-8305-5514

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Samoylenko Mykola

Assistant, Department of Process Automation, orcid.org/0000-0003-1893-1893

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

DYNAMIC SYNTHESIS AND ANALYSIS OF A DIGITAL CONTROL ALGORITHM FOR A THERMAL PLANT WITH LARGE QUANTIZATION STEP IN TIME

Abstract. In a digital automatic temperature control system it is advisable to select a large quantization step in time in order to reduce the wear of the actuator. In this case, the traditional PID control algorithm is not applicable. For this case, a universal control algorithm with a finite control time has been synthesized in the form of a discrete transfer function of the third order by methods of discrete operational calculus on the basis of the z-transformation. The synthesized control algorithm is applicable for most thermal plants and provides control time equal to 2 to 3 clock cycles of the controller. The control algorithm has six tuning parameters (coefficients of the discrete transfer function of the regulator). Numerical values of the tuning parameters can be calculated if the main dynamic parameters of the plant in the continuous time are known – the static transmission coefficient, the first two time constants, the delay time, and the quantization step in time. The quantization step in time is recommended to be selected in the range 0.4 – 0.8 of the basic time constant of the plant.

Keywords: synthesis; dynamics; control algorithm; discrete time; thermal plant; quantization step

References

1. Popovich, M.G., Kovalchuk, V.A. (2007). *Theory of automatic control: Textbook*. Kyiv, Ukraine: Lybid, 656.
2. Ladaniuc, A.P. & Arkhangelskaya, K.S. (2007). *Theory of automatic control (part 1): Abstract of lectures*. Kyiv: KNUCA, 102.
3. Abramenko, G.I. & Abramenko, D.I. (2008). *Theory of automatic control: the Abstract of lectures*. Kharkiv: 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, P. 232.
11. Astrom, K. & Wittenmark, B. (1987). *Computer controlled systems*. Moscow, MIR, 480.
12. Inosov, Sergei & Bondarchuk, Olga. (2017). *Discretization of the dynamic model of a thermal plant regulation with large quantization step in time. Management of development of complex systems*, 31, 192–197.

Ссылка на публикацию

APA Inosov Sergei & Samoylenko, Mykola. (2018). *Dynamic synthesis and analysis of a digital control algorithm for a thermal plant with large quantization step in time. Management of Development of Complex Systems*, 36, 203 – 208.

ГОСТ Иносов С.В. Синтез и анализ динамики цифрового алгоритма регулирования теплового технологического объекта с большим шагом квантования во времени [Текст] / С.В Иносов, Н.И Самойленко // Управление развитием сложных систем. – 2018. – № 36. – С. 203 – 208.