

УДК 681.51.01

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

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

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

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ С БОЛЬШИМ ШАГОМ КВАНТОВАНИЯ ВО ВРЕМЕНИ

Аннотация. Получена модель динамики теплового объекта регулирования в квантованном времени в виде дискретной передаточной функции по известной передаточной функции объекта в непрерывном времени с учетом запаздывания и двух основных инерционностей. Предлагаемая дискретная модель учитывает нестационарные операции выборки и фиксации, оставаясь тем не менее, стационарной за счет перехода к дискретному времени. Полученная линейная стационарная модель может быть использована для последующего синтеза алгоритма регулирования методами дискретного операционного исчисления. Модель дает результаты, близкие к точным, даже если шаг квантования времени не является достаточно малым и может быть отнесена к универсальной и пригодной для анализа большинства тепловых объектов.

Ключевые слова: динамическая модель; дискретное время; тепловой объект; шаг квантования, передаточная функция

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 [4; 5]. В этом случае 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, такими как 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. При этом переходный процесс регулирования заканчивается всего за 2 – 3 такта работы регулятора (рис. 1). Манипуляции управляющим воздействием в этом случае оказываются минимальными, что резко уменьшает износ исполнительного механизма. Дополнительным преимуществом является экономия количества вычислений и времени работы процессора.

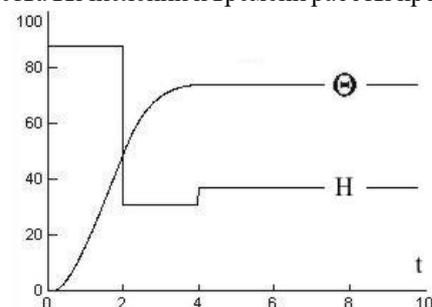


Рисунок 1 – Пример графиков изменения управляющего воздействия H (мощности нагрева в % от номинала) и регулируемой величины Θ (температуры в градусах) в непрерывном времени t (в часах). Шаг квантования времени – 2 часа.

В этом случае эффектами квантования времени пренебрегать уже нельзя. Расчеты в непрерывном времени резко усложняются, так как система автоматического регулирования становится нестационарной. Указанная проблема снимается за счет перехода к динамическим расчетам в квантованном (дискретном) времени. В данной работе рассматриваются вопросы, возникающие при составлении математической модели динамики теплового объекта регулирования в квантованном времени для случая большого шага квантования времени.

Анализ последних исследований и публикаций

Важной для динамических расчетов особенностью цифрового регулирования является его импульсный (дискретный во времени) характер. Циклично во времени осуществляется выборка информации от датчика. Выборка – это нестационарная операция превращения непрерывного сигнала (рис. 1) в выборочную последовательность значений (рис. 2).

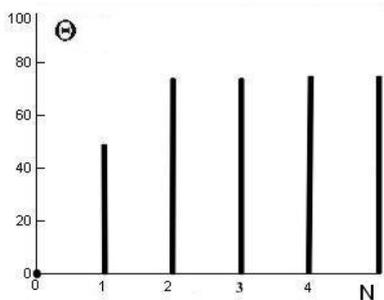


Рисунок 2 – График изменения температуры Θ в квантованном времени (время измеряется количеством тактов N)

При выдаче управляющего воздействия осуществляется обратная операция превращения вычисленной регулятором последовательности значений (рис. 3) в непрерывный сигнал (рис. 1). Эта операция (тоже нестационарная) называется фиксацией, так как на протяжении такта фиксируется последнее выданное значение.

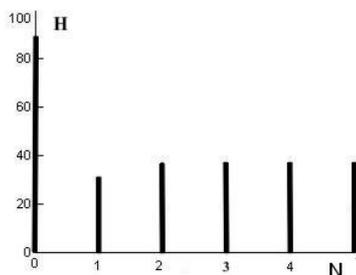


Рисунок 3 – Графики изменения мощности нагрева H в квантованном времени (время измеряется количеством тактов N)

Дополнительно осуществляется нелинейная операция аналого-цифрового преобразования

физической величины в число – кодирование (обратная операция – декодирование). Однако при динамических расчетах можно пренебречь нелинейными эффектами кодирования, так как разрядность представления действительных чисел, как правило, достаточно велика.

Но мы не можем пренебрегать нестационарными эффектами квантования во времени, так как специально исследуем случай большого шага квантования, соизмеримого с длительностью переходных процессов. При этом динамические расчеты в непрерывном времени (особенно задачи 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 сохраняется 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.

Математическими моделями, которыми традиционно описывают динамические свойства линейных инерционных стационарных объектов регулирования в непрерывном времени, являются передаточные функции на базе преобразования Лапласа [1 – 3].

Типовая передаточная функция теплового объекта в непрерывном времени имеет вид [4; 5]:

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

где K – статический коэффициент передачи объекта; T_3 – время запаздывания; T_1, T_2 – первая и вторая постоянные времени объекта; p – комплексный аргумент.

Передаточную функцию можно интерпретировать как представление амплитудно-фазо-частотной характеристики (АФЧХ) объекта, т.е. зависимости комплексного коэффициента усиления от круговой частоты ω , где $p = j\omega$ (j – мнимая единица). АФЧХ определяет зависимость выхода (температуры) объекта от входа (мощности нагрева) при использовании частотных спектральных методов расчета.

Приведенная модель объекта (1) может быть признана универсальной, пригодной для любых тепловых объектов, т.к. она учитывает все существенные особенности таких объектов: статику, наличие апериодических инерционностей (учитываются две основные с постоянными времени

T_1 и T_2 .) и запаздывания $e^{-P T_3}$, которое относительно мало в общей инерционности объекта, но сильно ограничивает запас устойчивости регулирования. Даже если объект не имеет «транспортного» запаздывания, передаточная функция $e^{-P T_3}$ интегрально учитывает все малые инерционности, не учтенные двумя основными постоянными времени.

Цель статьи

Предположим, что численные значения параметров модели объекта в непрерывном времени нам известны (например, на рис. 1 $K = 2$ град/%, $T_3 = 0.1$ ч, $T_1 = 3$ ч, $T_2 = 1$ ч). Известен также шаг квантования времени τ (для принятого примера $\tau = 2$ часа). Задачей является получение на основе z -преобразования модели объекта в дискретном времени в виде дискретной передаточной функции $W(z^{-1})$, пригодной для синтеза алгоритма регулирования и расчета его параметров.

Целью является создание соответствующей процедуры перехода от непрерывной модели (1) к соответствующей дискретной модели.

Изложение основного материала

На рис. 4 приведена структурная схема модели взаимодействия цифрового регулятора с объектом регулирования.



Рисунок 4 – Структурная схема модели взаимодействия цифрового регулятора с объектом регулирования

Модель объекта в непрерывном времени описывает зависимость температуры Θ от мощности нагрева H , как функций непрерывного времени t . H , Θ и t – действительные переменные. $H(t)$ и $\Theta(t)$ – непрерывные (аналоговые) физические величины. Цифровой регулятор (программно реализованный алгоритм регулирования) реализует зависимость мощности нагрева H от температуры Θ как функций дискретного времени N . N – целая переменная (номер такта). $H(N)$ и $\Theta(N)$ – последовательности действительных чисел в памяти цифрового регулятора, обрабатываемые в реальном времени (по

мере поступления). Преобразование $\Theta(t)$ в $\Theta(N)$ функционально осуществляется с помощью выборки и кодирования. Физически оно реализуется с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Преобразование $H(N)$ в $H(t)$ функционально осуществляется с помощью декодирования и фиксации. Физически оно реализуется с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Задачей является получение эквивалентной модели взаимодействия цифрового регулятора с объектом регулирования, из которой непрерывное время и непрерывные (аналоговые) величины исключены (рис. 5). Мы как бы принимаем точку зрения программиста, для которого цифровой регулятор – это компьютерная программа, время определяется тактами работы этой программы, а объект регулирования – это просто алгоритм преобразования одной числовой последовательности $H(N)$ в другую $\Theta(N)$.



Рисунок 5 – Эквивалентная схема взаимодействия цифрового регулятора с объектом регулирования в дискретном времени

Возможно множество форм представления дискретной модели объекта, поэтому мы сразу рассмотрим искомый вариант, наиболее подходящий для синтеза алгоритма регулирования.

Искомая дискретная передаточная функция объекта регулирования имеет вид:

$$W_0(z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}, \quad (2)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты числителя, a_1, a_2 – коэффициенты знаменателя передаточной функции, z^{-1} – единичное запаздывание (оператор задержки сигнала на один такт).

Формы представления передаточной функции могут быть многочисленными (за счет эквивалентных алгебраических преобразований), но именно вариант (2) имеет минимальный порядок, простую структуру и подходит для синтеза алгоритма регулирования методами операционного исчисления. Процедура синтеза регулятора выходит за рамки данной работы. Целью является вычисление значений коэффициентов $b_0, b_1, b_2, b_3, a_1, a_2$ при известных параметрах K, T_1, T_2, T_3 непрерывной модели объекта (1). При этом

дискретная модель (2) должна точно (не приближенно) отображать динамику объекта регулирования в квантованном времени, даже если шаг квантования τ не является малым.

Физический смысл дискретной передаточной функции (2) проясняется при рассмотрении соответствующего разностного уравнения, связывающего входную $H(N)$ и выходную $\Theta(N)$ числовые последовательности:

$$\Theta(N) = a_1 \cdot \Theta(N-1) + a_2 \cdot \Theta(N-2) + b_0 \cdot H(N) + b_1 \cdot H(N-1) + b_2 \cdot H(N-2) + b_3 \cdot H(N-3) \quad (3)$$

Дискретная модель объекта регулирования в форме (3) уже не допускает эквивалентных алгебраических преобразований, но она подходит для программной реализации. Значение выхода $\Theta(N)$ на такте с номером N вычисляется путем сложения произведений предыдущих значений входной и выходной числовых последовательностей с соответствующими весовыми коэффициентами. Предыдущие значения за последние несколько тактов должны запоминаться и храниться в оперативной памяти. Знаменателю дискретной передаточной функции (2) соответствует рекурсивная часть разностного уравнения (3) (для расчета используется выходная числовая последовательность), числителю соответствует нерекурсивная часть уравнения (для расчета используется входная числовая последовательность).

Возможность выполнения алгебраических преобразований передаточных функций является мощным инструментом анализа и синтеза алгоритмов цифрового автоматического регулирования и фильтрации цифровых сигналов. Соответствующий математический аппарат называется операционным исчислением [6].

Разложим передаточную функцию (1) на элементарные слагаемые

$$K_1 \frac{e^{-pT_3}}{T_1 p + 1} + K_2 \frac{e^{-pT_3}}{T_2 p + 1}, \quad (3)$$

где коэффициенты влияния K_1, K_2 вычисляются по формулам:

$$K_1 = \frac{K}{1 - \frac{T_2}{T_1}}; \quad K_2 = \frac{K}{1 - \frac{T_1}{T_2}}. \quad (4)$$

Вместо $\frac{e^{-pT_3}}{T_1 p + 1}$ и $\frac{e^{-pT_3}}{T_2 p + 1}$ подставим

эквивалентные дискретные передаточные функции

$$\frac{A_1 + B_1 z^{-1}}{1 - \alpha_1 z^{-1}} \cdot z^{-1}, \quad \frac{A_2 + B_2 z^{-1}}{1 - \alpha_2 z^{-1}} \cdot z^{-1}, \quad (5)$$

где α_1 и α_2 (полюса передаточной функции) вычисляются по формулам:

$$\alpha_1 = e^{-\frac{\tau}{T_1}}, \quad \alpha_2 = e^{-\frac{\tau}{T_2}}. \quad (6)$$

Остальные коэффициенты вычисляются по формулам:

$$A_1 = 1 - \alpha_1 \cdot e^{-\frac{T_3}{T_1}}, \quad A_2 = 1 - \alpha_2 \cdot e^{-\frac{T_3}{T_2}}; \quad (7)$$

$$B_1 = 1 - \alpha_1 - A_1, \quad B_2 = 1 - \alpha_2 - A_2.$$

В результате получим

$$W_0(z^{-1}) = K_1 \frac{A_1 + B_1 z^{-1}}{1 - \alpha_1 z^{-1}} z^{-1} + K_2 \frac{A_2 + B_2 z^{-1}}{1 - \alpha_2 z^{-1}} z^{-1}. \quad (8)$$

После приведения к общему знаменателю и раскрытия скобок получим необходимую нам форму записи (2), где

$$b_0 = 0$$

$$b_1 = K_1 \cdot A_1 + K_2 \cdot A_2$$

$$b_2 = B_1 \cdot K_1 + B_2 \cdot K_2 - K_1 \cdot A_1 \cdot \alpha_2 - K_2 \cdot A_2 \cdot \alpha_1 \quad (9)$$

$$b_3 = -B_1 \cdot K_1 \cdot \alpha_2 - B_2 \cdot K_2 \cdot \alpha_1$$

$$a_1 = -\alpha_1 - \alpha_2$$

$$a_2 = \alpha_1 \cdot \alpha_2.$$

Таким образом, для перехода от непрерывной передаточной функции (1) к дискретной (2) следует использовать формулы (4), (6), (7), (9).

Примечания:

1. Вышеприведенные формулы справедливы, если $0 \leq T_3 \leq \tau$ (запаздывание не превышает одного такта).

2. При необходимости большее запаздывание учитывается введением дополнительного множителя z^{-n} , где n - целое число тактов.

3. Целые или рациональные соотношения значений T_1, T_2, T_3 и τ необязательны.

Для рассмотренного примера по вышеприведенным формулам получены следующие численные значения параметров дискретной модели объекта регулирования: $b_0 = 0$; $b_1 = 0.557$; $b_2 = 0.284$; $b_3 = 0.000242$; $a_1 = -0.649$; $a_2 = 0.0695$.

Полученная модель в виде дискретной передаточной функции $W(z^{-1})$ позволяет рассчитать температурную реакцию $\Theta(N)$ на любое изменение управляющего воздействия $H(N)$ методами дискретного операционного исчисления. Для примера на рис. 6 приведена реакция температуры объекта на полное (100%) включение нагрева на 5 тактов. Максимум температуры (189°) достигнут на 5-м такте.

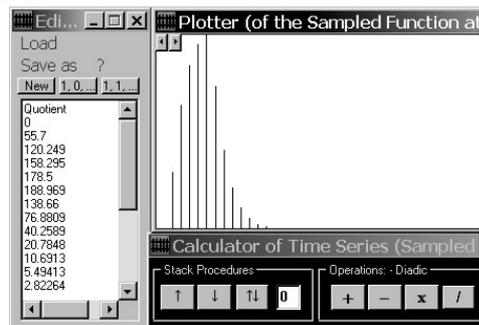


Рисунок 6 – Реакция температуры объекта регулирования на включение нагрева на 5 тактов

Искомая числовая последовательность $\Theta(N)$ (левое окно) и ее график в виде решетчатой функции (правое верхнее окно) на рис.6 получены с помощью калькулятора алгебры решетчатых функций. Калькулятор специально разработан нами для оперативного решения задач анализа и синтеза цифровых регуляторов [10; 11]. В отличие от стандартного калькулятора, операндами являются не числа, а числовые последовательности. Основной операцией является свертка двух числовых последовательностей, которая интерпретируется как умножение. На самом деле она только похожа на умножение по своим свойствам, что позволяет сконструировать специальную алгебру для таких операндов. Основные приложения находятся в областях: теория автоматического управления, линейная фильтрация сигналов, моделирование динамики систем, идентификация объектов, анализ и синтез цифровых регуляторов и фильтров, расчеты устойчивости, прогнозирование временных рядов, обработка данных (сглаживание, интерполяция, экстраполяция, дифференцирование, интегрирование) и т.п.

Расчет выполнялся следующим образом. Входная числовая последовательность 100; 100; 100; 100; 100; 0; 0; ... (мощность нагрева) была умножена на числовую последовательность 0; 0.557; 0.284; 0.000242; 0; 0; ... (коэффициенты числителя передаточной функции (2)) и поделена на числовую последовательность 1; -0.649; 0.0695; 0; 0; ... (коэффициенты знаменателя передаточной функции (2)).

Выводы

1. В системе цифрового автоматического регулирования температуры иногда целесообразно выбрать большой шаг квантования времени, чтобы переходный процесс регулирования заканчивался за 2 – 3 такта, что резко уменьшит износ исполнительного механизма.

2. Синтез алгоритма регулирования для заданного объекта в таком случае целесообразно производить в квантованном времени методами дискретного операционного исчисления на основе z-преобразования.

3. Предложена процедура получения модели динамики объекта регулирования в квантованном времени в виде дискретной передаточной функции, если известна традиционная передаточная функция объекта в непрерывном времени с учетом запаздывания и двух основных инерционностей.

4. Предлагаемая дискретная модель учитывает нестационарные операции выборки и фиксации, оставаясь при этом стационарной за счет перехода к дискретному времени.

5. Полученная линейная стационарная модель в дискретном времени может быть использована для последующего синтеза алгоритма регулирования методами операционного исчисления. Она дает результаты, близкие к точным, даже если шаг квантования времени не является малым, а также может считаться универсальной, пригодной для анализа большинства тепловых объектов.

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*. – 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*. – СПб: 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*. – № 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. Острем К., Виттенмарк Б. *Системы управления с ЭВМ*. – М.: – Мир, 1987. – 480 с.

Статья поступила в редколлегию 31.07.2017

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

Іносов 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 Вячеславівна

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

**ДИСКРЕТИЗАЦІЯ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛООВОГО ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ
З ВЕЛИКИМ КРОКОМ КВАНТУВАННЯ В ЧАСІ**

Анотація. Запропоновано процедуру отримання моделі динаміки теплового об'єкта регулювання у квантованому часі у вигляді дискретної передаточної функції по відомій передаточній функції об'єкта в безперервному часі з урахуванням запізнення і двох основних інерційностей. Запропонована дискретна модель враховує нестационарні операції вибірки і фіксації, залишаючись стаціонарною за рахунок переходу до дискретного часу. Отримана лінійна стаціонарна модель може бути використана для подальшого синтезу алгоритму регулювання методами дискретного операційного числення. Модель дає точні результати, навіть якщо крок квантування часу не є малим. Вона може вважатися універсальною, придатною для більшості теплових об'єктів.

Ключові слова: динамічна модель; дискретний час; тепловий об'єкт; крок квантування; передаточна функція

Inosov Sergei

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

Bondarchuk Olga

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

**DISCRETIZATION OF THE DYNAMIC MODEL OF A THERMAL PLANT REGULATION
WITH LARGE QUANTIZATION STEP IN TIME**

Abstract. Procedure is proposed to simulate the dynamics of thermal plant regulation in quantized time, in the form of discrete transfer function by the known transfer function of the plant in continuous time, given the delay and the two main time constants. The proposed discrete model takes into account non-stationary operations of sampling and fixation, however, it is stationary, due to the transition to discrete time. The obtained linear stationary model can be used for subsequent synthesis of regulating algorithm, using the discrete operational calculus. The model is precise, even if the quantization step in time is not small. It can be considered a universal model for most thermal plants. The model is intended for cases when the quantization step in time is large. In this case the regulatory process ends in just 2–3 cycles of operation of the regulator. Manipulations of actuator in this case are minimal, which greatly reduces the wear of the actuator.

Keywords: dynamic model; discrete time; thermal plant; step of quantization; transfer function

References

1. Popovich, M.G., Kovalchuk, V.A. (2007). *Theory of automatic control Textbook*. Kyiv, Ukraine: Lybid, 656.
2. Ladaniuc, A.P., Arkhangelskayam K.S. (2007). *Theory of automatic control (part 1): Abstract of lectures*. Kyiv, Ukraine: KNUCA, 102.
3. Abramenko, G.I., Abramenko, D.I. (2008). *Theory of automatic control: the Abstract of lectures*. Kharkiv, Ukraine: HNAMG, 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. (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.

ГОСТ Иносов С.В. Дискретизация динамической модели теплового объекта регулирования с большим шагом квантования во времени [Текст] / С. В. Иносов, О.В. Бондарчук // Управление развитием сложных систем. – 2017. – № 31. – С. 192 – 197.