

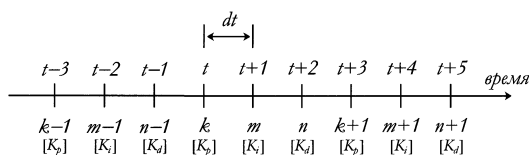
(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **202200084** (13) **A1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**(43) Дата публикации заявки
2022.11.30(51) Int. Cl. **G05B 13/02 (2006.01)**(22) Дата подачи заявки
2019.12.27(54) **МЕТОД АДАПТИВНОЙ НАСТРОЙКИ ЦИФРОВОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА**(86) **PCT/DE2019/000338**(74) Представитель:
Гаврилова Е.А. (RU)(87) **WO 2020/094169 2020.05.14**(88) **2021.01.28**(71)(72) Заявитель и изобретатель:
ДИМАКОВ ВАЛЕНТИН (DE)

(57) Целью изобретения является быстрая автоматическая настройка параметров цифрового ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференциального) по аналоговой обратной связи от переменной процесса для автоматизации технологических процессов на программируемых логических контроллерах (ПЛК). Настоящее изобретение основывается на использовании девяти уравнений настройки, выведенных через обратный инжиниринг ПИД-регулятора. Настройка параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора осуществляется отдельно во времени в замкнутом контуре управления с отрицательной обратной связью, т.е. независимо друг от друга на итерационных шагах k для K_p , m для K_i и n для K_d (см. фигуру). Метод адаптивной настройки является компактным, независимым от других методов и алгоритмов, математически сбалансированным (т.е. минимальная потребность в вычислительных ресурсах) и легко реализуемым. Настройка ПИД-регулятора с помощью настоящего метода не требует предварительной оценки управляемого объекта и построения его математической модели. Это подразумевает универсальность его использования.

**A1****202200084****202200084****A1**

МЕТОД АДАПТИВНОЙ НАСТРОЙКИ ЦИФРОВОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Область техники

Изобретение относится к быстрой автоматической настройке параметров цифрового ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференциального) для автоматизации технологических процессов на программируемых логических контроллерах.

Предшествующий уровень техники

В большинстве случаев для автоматизации технологических процессов на производстве используются программируемые логические контроллеры (ПЛК), которые состоят из процессорного модуля и нескольких модулей ввода/вывода. Такой состав электронных модулей позволяет обрабатывать сигналы от дискретных и аналоговых датчиков, и управлять различными приводами компрессоров, насосов и клапанов.

С помощью автоматического регулирования часто требуется поддерживать постоянную температуру, давление, уровень жидкости или объём газа в каком-нибудь сегменте промышленной установки. Это может быть достигнуто с помощью ПИД-регулятора, который доказал свою надёжность и универсальность за долгое время использования.

Ручная настройка ПИД-регулятора не является сложной задачей, если, например, датчик температуры или давления находится рядом с исполнительным органом (т.е. клапаном или насосом), или эффект от его воздействия не так сильно проявляется на переменной процесса.

Однако ручная настройки ПИД-регулятора значительно усложняется, если датчик регулируемой величины расположен далеко от исполнительного органа и воздействие на него происходит с большой задержкой во времени. Или, например, в холодильной машине осуществляется регулирование температуры перегрева хладагента одновременно по значениям от двух аналоговых датчиков, а именно: температуры и давления хладагента. В подобных и других случаях ручная настройка ПИД-регулятора

требует наличия большого опыта и глубокого понимания работы промышленного оборудования. Поэтому важно иметь такое устройство, которое смогло бы делать это автоматически.

Решение проблемы автоматической настройки ПИД-регулятора можно сравнить с задачей поиска оптимального решения. Здесь важным фактором является выбор начальных параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора (т. е. пропорционального K_p , интегрального K_i и дифференциального K_d коэффициентов), которые являются отправной точкой метода адаптивной настройки.

Научные публикации и изобретения по данной теме часто отдают предпочтение методам автоматической настройки ПИД-регулятора с использованием механизма нечёткого логического вывода, которые позволяют получить результаты с высоким качеством решения. Однако общая стоимость такого решения также высока, учитывая следующие особенности:

- Относительно высокая вычислительная нагрузка математического аппарата нечёткого логического вывода. ПЛК обычно выполняют различные задачи по автоматизации технологических процессов и для этого могут одновременно использовать большое количество ПИД-регуляторов. Если механизм нечёткого логического вывода будет постоянно использоваться для изменения управляющих переменных, то совокупная вычислительная нагрузка может оказаться очень высокой даже для современных ПЛК.
- Привязка к определённой задаче, т.е. набор правил нечёткого логического вывода, также как параметры функций для фаззификации и дефаззификации, подбираются под решение чётко поставленной задачи. Это приводит к потере универсальности такого метода решения.

Существуют также альтернативные решения, которые применяют различные методы, в зависимости от сложности управляемых объектов. При этом процесс адаптивной настройки состоит, как правило, из двух этапов [1,2]. На первом этапе используется метод Циглера-Никольса для фиксации замкнутого контура управления в пределах границ устойчивости.

Также в [1] часто выдвигается предположение относительно вида управляемого объекта, а именно: второго или третьего порядка. Благодаря этому для второго этапа выбираются необходимые методы для настройки параметров ПИД-регулятора: метод

размещения полюсов, метод Banyász-Keviczky или метод Dahlin. В заключении [1] отмечается, что данный метод настройки тестировался только на управляемых объектах второго и третьего порядка.

В [2] решается только одна единственная задача, а именно автоматическая настройка параметров ПИД-регулятора для теплообменника. Для этого на втором этапе используется расширенный метод Циглера-Никольса, для которого выбор коэффициентов настройки параметров ПИД-регулятора не раскрывается.

РАСКРЫТИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Целью изобретения является быстрая автоматическая настройка параметров ПИД-регулятора по аналоговой обратной связи от переменной процесса для автоматизации технологических процессов на программируемых логических контроллерах.

Настоящее изобретение основывается на использовании девяти уравнений настройки, выведенных через обратный инжиниринг ПИД-регулятора. Адаптивная настройка параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора осуществляется отдельно во времени, т. е. в каждый момент времени происходит адаптация только одного из параметров. Эта особенность обусловлена уравнениями, выведенными для метода адаптивной настройки. Поэтому невозможно одновременно осуществлять процесс адаптации для всех трёх параметров ПИД-регулятора. В некоторых уравнениях настройки используются дополнительные ограничивающие коэффициенты для обеспечения мягкого затухания метода адаптивной настройки и для предотвращения резкого изменения параметров ПИД-регулятора на заключительном этапе.

Особенности изобретения:

- Метод адаптивной настройки является компактным, независимым от других методов и алгоритмов, математически сбалансированным (т. е. минимальная потребность в вычислительных ресурсах) и легко реализуемым.
- Настройка ПИД-регулятора с помощью настоящего метода не требует предварительной оценки управляемого объекта и построения его математической модели. Это подразумевает универсальность его использования, т. к. нет привязки к определённому управляемому объекту.

Возможное ограничение при использовании:

- Сходимость метода адаптивной настройки зависит от выбранных начальных значений параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора по аналогии с алгоритмами поиска минимума в задачах оптимизации.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Все особенности, которые подчёркивают новизну изобретения, подробно описываются в прилагаемой формуле изобретения. Однако вся суть изобретения отражена в нижеследующем подробном описании со ссылками на чертежи лучшего варианта осуществления изобретения:

Фиг. 1. Временная шкала настройки ПИД-регулятора

Фиг. 2А. Блок-схема метода адаптивной настройки ПИД-регулятора (начало)

Фиг. 2В. Блок-схема метода адаптивной настройки ПИД-регулятора (окончание)

Фиг. 3. Замкнутый контур управления

Фиг. 4. Реакция управляемого объекта №1 на ступенчатую функцию

Фиг. 5. Реакция управляемого объекта №2 на ступенчатую функцию

Фиг. 6. Реакция управляемого объекта №3 на ступенчатую функцию

Фиг. 7. Реакция управляемого объекта №4 на ступенчатую функцию

Фиг. 8. Реакция управляемого объекта №5 на ступенчатую функцию

ЛУЧШИЙ ВАРИАНТ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Данное подробное описание с сопровождающими чертежами относится к лучшему варианту осуществления изобретения, которое не должно восприниматься как урезанный вариант предмета изобретения. Все изменения и дополнения, содержащиеся в формуле изобретения, раскрываются соответствующими пунктами формулы изобретения.

Далее описывается лучший вариант осуществления изобретения.

Настоящее изобретение относится к адаптивной настройке ПИД-регулятора, который описывается стандартным уравнением следующего вида [3]:

$$y_t = K_p \cdot e_t + K_i \cdot \int e_t dt + K_d \cdot \frac{de_t}{dt} . \quad (1)$$

где:

y_t – управляющая переменная в момент времени t ;

e_t – ошибка регулирования между уставкой w и переменной процесса x_t в момент времени t , которая вычисляется как $e_t = w - x_t$;

K_p – пропорциональный коэффициент;

K_i – интегральный коэффициент;

K_d – дифференциальный коэффициент.

ПИД-регулятор (1) является основой для обратного инжиниринга при выводе уравнений настройки параметров K_p , K_i и K_d . Данный метод вывода характеризуется следующей последовательностью шагов:

Шаг 01: Удаление интегратора, представленного в ПИД-регуляторе в явном виде. Это достигается путём дифференцирования обеих частей уравнения (1) относительно переменной времени t [3]:

$$dy_t = K_p \cdot de_t + K_i \cdot e_t \cdot dt + K_d \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} . \quad (2)$$

Шаг 02: Фиксация двух из трёх параметров ПИД-регулятора в каждый момент времени t . Чтобы максимально упростить метод вывода уравнений настройки, два из трёх параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора последовательно используются в качестве постоянных величин. Т.е. K_i и K_d используются в качестве постоянных величин в уравнениях настройки параметра K_p в момент времени t . K_p и K_d используются в качестве постоянных величин в уравнениях настройки параметра K_i в момент времени $t+1$. А K_p и K_i используются в качестве постоянных величин в уравнениях настройки параметра K_d в момент времени $t+2$. Благодаря этому осуществляется раздельная во времени адаптивная настройка параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора, т.е. в каждый момент времени t адаптируется только один из параметров. Для раздельной адаптации параметров ПИД-регулятора во времени и для управления итерационными шагами используются три дополнительных индекса k для K_p , m для K_i и n для K_d (см. Фиг. 1). С этими индексами ПИД-регулятор (2) приобретает окончательный вид:

$$dy_t = K_{p_k} \cdot de_t + K_{i_m} \cdot e_t \cdot dt + K_{d_n} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} \quad (3)$$

Шаг 03: Вывод уравнения для вычисления шага адаптации dK_{p_k} пропорционального коэффициента K_p . Для этого параметр K_{p_k} выражается из (3) и полученное уравнение дифференцируется относительно переменной времени t :

$$dK_{p_k} = \frac{\left(d^2 y_t - K_{i_{m-1}} \cdot de_t \cdot dt - K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} \right) \cdot de_t}{(de_t)^2} - \frac{\left(dy_t - K_{i_{m-1}} \cdot e_t \cdot dt - K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} \right) \cdot d^2 e_t}{(de_t)^2} \quad (4)$$

где:

dy_t – изменение управляющей переменной y_t в момент времени t , которое определяется как $dy_t = y_t - y_{t-1}$;

$d^2 y_t$ – дифференциал 2-го порядка управляющей переменной y_t в момент времени t , который вычисляется как $d^2 y_t = dy_t - dy_{t-1}$;

de_t – дифференциал 1-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $de_t = e_t - e_{t-1}$;

$d^2 e_t$ – дифференциал 2-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $d^2 e_t = e_t - 2 \cdot e_{t-1} + e_{t-2}$;

$d^3 e_t$ – дифференциал 3-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $d^3 e_t = e_t - 3 \cdot e_{t-1} + 3 \cdot e_{t-2} - e_{t-3}$;

$K_{i_{m-1}}$ – интегральный коэффициент K_i в момент времени t , который был адаптирован на итерационном шаге $m-1$;

$K_{d_{n-1}}$ – дифференциальный коэффициент K_d в момент времени t , который был адаптирован на итерационном шаге $n-1$.

Шаг 04: Определить правило для адаптации пропорционального коэффициента K_p на итерационном шаге k следующим образом:

$$K_{p_k} = K_{p_{k-1}} - \alpha_{p_k} \cdot dK_{p_k}, \quad \alpha_{p_k} \cdot dK_{p_k} \in [-0,5, +0,5]. \quad (5)$$

где:

$K_{p_{k-1}}$ – пропорциональный коэффициент K_p в момент времени t , который был адаптирован на итерационном шаге $k-1$;

α_{pk} – скорость адаптации пропорционального коэффициента K_p на итерационном шаге k .

Уравнение (5) ограничивает максимальное изменение параметра K_p до $\pm 0,5$, чтобы предотвратить неуправляемость метода настройки.

Шаг 05: Вывод уравнения для вычисления скорости адаптации α_{pk} пропорционального коэффициента K_p . Для этого уравнение (5) подставляется в (3) и из полученного уравнения выражается ошибка регулирования e_t . Принимая во внимание, что предел e_t при $t \rightarrow +\infty$ равен нулю, из полученного уравнения выражается α_{pk} :

$$\alpha_{pk} = \frac{K_{pk-1} \cdot de_t + K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} - dy_t}{dK_{pk} \cdot de_t} \cdot dt, \quad (6)$$

$$\alpha_{pk} \in \left[0,0001, \frac{e_t^*}{2,71828} \in [0,0001, 1] \right]$$

Данное уравнение характеризуется дополнительным ограничением параметра α_{pk} в диапазоне от 0,0001 до 1, в зависимости от ошибки регулирования e_t . Это обеспечивает мягкое затухание метода адаптивной настройки на конечном этапе. Кроме того, благодаря этому предотвращается резкое изменение пропорционального коэффициента K_p , когда ошибка регулирования e_t приближается к нулю.

Шаг 06: Вывод уравнения для вычисления шага адаптации dK_{im} интегрального коэффициента K_i . Для этого параметр K_{im} выражается из (3) и полученное уравнение дифференцируется относительно переменной времени t :

$$dK_{im} = \frac{\left(d^2 y_t - K_{pk} \cdot d^2 e_t - K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} \right) \cdot e_t}{e_t^2 \cdot dt} - \frac{\left(dy_t - K_{pk} \cdot de_t - K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} \right) \cdot de_t}{e_t^2 \cdot dt} \quad (7)$$

Шаг 07: Определить правило для адаптации интегрального коэффициента K_i на итерационном шаге m следующим образом:

$$K_{im} = K_{im-1} + \alpha_{im} \cdot dK_{im}. \quad (8)$$

$$\alpha_{im} \cdot dK_{im} \in [-0,5, +0,5],$$

где:

α_{im} — скорость адаптации интегрального коэффициента K_i на итерационном шаге m .

Уравнение (8) ограничивает максимальное изменение параметра K_i до $\pm 0,5$, чтобы предотвратить неуправляемость метода настройки.

Шаг 08: Вывод уравнения для вычисления скорости адаптации α_{im} интегрального коэффициента K_i . Для этого уравнение (8) подставляется в (3) и из полученного уравнения выражается дифференциал 1-го порядка ошибки регулирования de_t . Принимая во внимание, что предел de_t при $t \rightarrow +\infty$ равен нулю, из полученного уравнения выражается α_{im} :

$$\alpha_{im} = \frac{dy_t - K_{im-1} \cdot e_t \cdot dt - K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt}}{dK_{im} \cdot e_t} \cdot dt, \quad (9)$$

$$\alpha_{im} \in \left[0,0001, \frac{4 \cdot |e_t^2|}{2,71828} \in [0,0001, 1] \right]$$

Данное уравнение характеризуется дополнительным ограничением параметра α_{im} в диапазоне от 0,0001 до 1, в зависимости от ошибки регулирования e_t . Это обеспечивает мягкое затухание метода адаптивной настройки на конечном этапе. Кроме того, благодаря этому предотвращается резкое изменение интегрального коэффициента K_i , когда ошибка регулирования e_t приближается к нулю.

Шаг 09: Вывод уравнения для вычисления шага адаптации dK_{dn} дифференциального коэффициента K_d . Для этого параметр K_{dn} выражается из (3) и полученное уравнение дифференцируется относительно переменной времени t :

$$dK_{dn} = \left(\frac{(d^2 y_t - K_{pk} \cdot d^2 e_t - K_{im} \cdot de_t \cdot dt) \cdot d^2 e_t}{(d^2 e_t)^2} - \frac{(dy_t - K_{pk} \cdot de_t - K_{im} \cdot e_t \cdot dt) \cdot d^2 e_t}{(d^2 e_t)^2} \right) \cdot dt \quad (10)$$

Шаг 10: Определить правило для адаптации дифференциального коэффициента K_d на итерационном шаге n следующим образом:

$$\begin{aligned} K_{dn} &= K_{dn-1} - \alpha_{dn} \cdot dK_{dn}, \\ \alpha_{dn} \cdot dK_{dn} &\in [-0,5, +0,5]. \end{aligned} \quad (11)$$

где:

α_{dn} — скорость адаптации дифференциального коэффициента K_d на итерационном шаге n .

Уравнение (11) ограничивает максимальное изменение параметра K_d до $\pm 0,5$, чтобы предотвратить неуправляемость метода настройки.

Шаг 11: Вывод уравнения для вычисления скорости адаптации α_{dn} дифференциального коэффициента K_d . Для этого уравнение (11) подставляется в (3) и из полученного уравнения выражается ошибка регулирования e_t . Принимая во внимание, что предел e_t при $t \rightarrow +\infty$ равен нулю, из полученного уравнения выражается α_{dn} :

$$\begin{aligned} \alpha_{dn} &= \frac{K_{pk} \cdot de_t + K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} - dy_t}{dK_{dn} \cdot d^2 e_t} \cdot dt^2, \\ \alpha_{dn} &\in \left[0,0001, \frac{|e_t^*|}{13,5914} \in [0,0001, 1] \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Данное уравнение характеризуется дополнительным ограничением параметра α_{dn} в диапазоне от 0,0001 до 1, в зависимости от ошибки регулирования e_t . Это обеспечивает мягкое затухание метода адаптивной настройки на конечном этапе. Кроме того, благодаря этому предотвращается резкое изменение дифференциального коэффициента K_d , когда ошибка регулирования e_t приближается к нулю.

Шаг 12: Выбор цифрового ПИД-регулятора. Скоростной алгоритм ПИД-регулятора является наиболее подходящим вариантом для настоящего метода адаптивной настройки (см. [4], стр. 1085):

$$y_t = y_{t-1} + dy_{t+1} = \quad (13)$$

$$= y_{t-1} + \left(K_p + K_i \cdot dt + \frac{K_d}{dt} \right) \cdot e_t - \left(K_p + 2 \cdot \frac{K_d}{dt} \right) \cdot e_{t-1} + \frac{K_d}{dt} \cdot e_{t-2},$$

$$y_t \in [0, 100 \%], y_{t \leq 0} = dy_{t \leq 0} = 0.$$

где:

dy_{t+1} – изменение управляющей переменной для момента времени $t+1$;

dt – время дискретизации ПИД-регулятора.

В уравнении (13) всегда используются текущие значения параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора для момента времени t .

Выбор скоростного алгоритма ПИД-регулятора обусловлен следующим критерием:

- Непосредственная интеграция ошибок управления e_t в управляющей переменной y_t . На практике это позволяет, в случае необходимости, свободно изменять управляющую переменную y_t , чтобы обеспечить бесшовное регулирование без принудительной коррекции интегратора (в отличие от позиционного алгоритма ПИД-регулятора).

В заключении блок-схема, изображённая на Фиг. 2А и Фиг. 2В, объединяет и упорядочивает уравнения для автоматической настройки ПИД-регулятора в виде последовательности действий для достижения целостности и законченности описания настоящего изобретения.

Демонстрация изобретения

Чтобы достигнуть большей наглядности описания, изобретение демонстрируется на некоторых математических моделях управляемых объектов.

На Фиг. 3 представлен замкнутый контур управления с отрицательной обратной связью, состоящий из цифрового ПИД-регулятора и управляемого объекта.

Для демонстрации изобретения использовался адаптивный цифровой ПИД-регулятор, разработанный для ПЛК на языке программирования SCL (Structured Control Language [5], см. приложение А), с некоторыми передаточными функциями в качестве управляемых объектов (см. табл. I).

Таблица I. Передаточные функции $G(s)$ управляемых объектов в пространстве изображений

№	Передаточные функции $G(s)$	Источник
1	$G(s) = \frac{5000}{(s+1)(s+5)(s+100)}$	[6]
2	$G(s) = \frac{160000}{7,22 s^3 + 8,265 s^2 + 381600 s + 160000}$	[7]
3	$G(s) = \frac{1}{s^2 + s + 1}$	[8]
4	$G(s) = \frac{0,1 s + 10}{0,0004 s^4 + 0,045 s^3 + 0,555 s^2 + 1,41 s + 1}$	[9]
5	$G(s) = \frac{0,05187936 - 3,594 \times 10^{-6} s}{0,0002979 s^2 + 0,01011916 s + 0,0092}$	[10]

Поскольку передаточные функции $G(s)$ из пространства изображений невозможно использовать в ПЛК в явном виде, то они должны быть предварительно преобразованы в эквивалентные уравнения пространства состояний. Для этого передаточные функции $G(s)$ сначала преобразуются из пространства изображений посредством функции MATLAB *c2d* в эквивалентные дискретные z -передаточные функции с шагом дискретизации $dt=0,1$ с (см. табл. II).

Таблица II. Эквивалентные z -передаточные функции с шагом дискретизации $dt=0,1$ с

№	Дискретные z -передаточные функции $G(z)$
1	$G(z) = \frac{0,05488 + 0,2462 z^{-1} + 0,07307 z^{-2} + 0,0002884 z^{-3}}{1 - 1,511 z^{-1} + 0,5489 z^{-2} - 2,492 \times 10^{-5} z^{-3}}$

2	$G(z) = \frac{0,02055 + 0,0421 z^{-1} + 0,04063 z^{-2} + 0,01885 z^{-3}}{1 + 0,08548 z^{-1} - 0,07151 z^{-2} - 0,8918 z^{-3}}$
3	$G(z) = \frac{0,001625 + 0,006338 z^{-1} + 0,001546 z^{-2}}{1 - 1,895 z^{-1} + 0,9048 z^{-2}}$
4	$G(z) = \frac{0,00809 + 0,06928 z^{-1} + 0,05295 z^{-2} + 0,0036 z^{-3} - 9,182 \times 10^{-8} z^{-4}}{1 - 2,059 z^{-1} + 1,327 z^{-2} - 0,2546 z^{-3} + 1,301 \times 10^{-5} z^{-4}}$
5	$G(z) = \frac{0,1464 + 0,3096 z^{-1} + 0,02883 z^{-2}}{1 - 0,9475 z^{-1} + 0,03348 z^{-2}}$

Затем z -передаточные функции преобразуются в рекуррентные уравнения пространства состояний в виде полиномов следующего вида (см. подробнее [4], стр. 443–444):

$$x_t = b_1 \cdot x_{t-1} + b_2 \cdot x_{t-2} + b_3 \cdot x_{t-3} + b_4 \cdot x_{t-4} + a_0 \cdot y_t + a_1 \cdot y_{t-1} + a_2 \cdot y_{t-2} + a_3 \cdot y_{t-3} + a_4 \cdot y_{t-4}, \quad (14)$$

где:

y_t — управляющая переменная в момент времени t ;

x_t — реакция управляемого объекта на управляющую переменную в виде переменной процесса в момент времени t .

Все параметры полинома (14) для моделируемых управляемых объектов приведены в таблице III.

Таблица III. Параметры полинома (14) для передаточных функций управляемых объектов

№	b_1	b_2	b_3	b_4	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
1	1,511	-0,5489	$2,492 \times 10^{-5}$	0	$5,488 \times 10^{-2}$	0,2462	$7,307 \times 10^{-2}$	$2,884 \times 10^{-4}$	0
2	$-8,548 \times 10^{-2}$	$7,151 \times 10^{-2}$	0,8918	0	$2,055 \times 10^{-2}$	$4,21 \times 10^{-2}$	$4,063 \times 10^{-2}$	$1,885 \times 10^{-2}$	0

3	1,895	-0,9048	0	0	$1,625 \times 10^{-3}$	$6,338 \times 10^{-3}$	$1,546 \times 10^{-3}$	0	0
4	2,059	-1,327	0,2546	$-1,301 \times 10^{-5}$	$8,09 \times 10^{-3}$	$6,928 \times 10^{-2}$	$5,295 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-3}$	$-9,182 \times 10^{-8}$
5	0,9475	$-3,348 \times 10^{-2}$	0	0	0,1464	0,3096	$2,883 \times 10^{-2}$	0	0

Моделирование осуществлялась на компьютерном симуляторе ПЛК в виде замкнутого контура управления (см. Фиг. 3). Для всех математических моделей управляемых объектов из табл. I были получены результаты, которые представлены в табл. IV. При этом T_i – это постоянная времени интегрирования, определяемая как $T_i = K_p / K_i$, а T_d – это постоянная времени дифференцирования, определяемая как $T_d = K_d / K_p$. Все эксперименты проводились с начальными условиями $K_p=1$, $K_i=1$, $K_d=1$ и временем дискретизации $dt=0,1$ с. В качестве триггера активации использовалась ступенчатая функция $0 \rightarrow 1$.

Таблица IV. Параметры цифрового ПИД-регулятора, полученные с помощью метода адаптивной настройки

№	Параметры ПИД-регулятора для управляемых объектов			Фиг.
	K_p	T_i [с]	T_d [с]	
1	0,167542959333063	1,274823369	0,381714789	4
2	0,998936489520022	0,791433896	0,945415624	5
3	1,16564861359731	0,999456194	0,999827146	6
4	0,330603372851095	1,025824996	0,260850227	7
5	0,128946021372936	1,275031550	0,390702812	8

ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРИМЕНИМОСТЬ

Настоящее изобретение предполагается использовать в системах автоматизации промышленного оборудования с использованием ПЛК, где требуется индивидуальная настройка параметров ПИД-регулятора в управлении технологическими процессами на производстве.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Текст программы адаптивного ПИД-регулятора

```

001 FUNCTION_BLOCK "A-PID_CONTROL"
002 TITLE      = A-ПИД-регулятор
003 AUTHOR    :Valentin_Dimakov
004 FAMILY    :PID_CONTROL
005 NAME      : 'A-PID_CONTROL'
006 VERSION   : 13.44
007 //ФУНКЦИЯ
008 //ЦифровойПИД-регулятор с автоматической настройкой параметров
009 //
010 //Вызываемые блоки: нет
011
012 VAR INPUT
013MAN_ON      :Bool := FALSE;    // Переключение режимов работы (0=авто/1=ручной)
014AUT_ON      :Bool := FALSE;    // Активировать автоматический режим регулирования
015INV_CONTROL: Bool := FALSE;    // Направление регулирования (0=SP>PV, 1=PV>SP)
016CYCLE      :Time := T#100MS;  // Время дискретизации dtA-ПИД-регулятора[10мс..10с]
017SP         :LReal := 0.0;     // Уставкаw<температура, давление и т.д.>
018PV         :LReal := 0.0;     // Переменная процессаx<температура, давление и т.д.>
019LMN_LLM     :LReal := 0.0;     // Нижний предел управляющей переменной yt[0..99%]
020LMN_HLM     :LReal := 100.0;   // Верхний предел управл. переменной yt[LMN_LLM..100%]
021END_VAR
022
023VAR OUTPUT
024CTRL_ERR: LReal := 0.0; // Ошибкарегулированияet
025LMN     :LReal := 0.0; // Управляющая переменная yt [0..100%]
026ERR_CODE: USInt := 0;  // Код ошибки А-ПИД-регулятора<> 0, 0=нет ошибки
027END_VAR
028
029VAR IN_OUT
030SELF_TUN_ON :Bool := FALSE; // Активировать автонастройку А-ПИД-регулятора
031GAIN        :LReal := 1.0;   // Пропорциональный коэффициент Kp [0,01..30]
032TI         :LTime := LT#1S; // Постоянная времени интегрирования Ti [CYCLE..100м]
033TD         :LTime := LT#1S; // Постоянная времени дифференцирования Td [0..60с]
034TUN_ERR_TOLER: LReal := 0.01; // Порог для отключения автонастройки [0..100]
035TUN_COMPL_TM :Time := T#3S;  // Задержка перед отключением автонастройки [1с..1м]
036LMN_MAN      :LReal := 0.0;   // Управляющая переменная в ручном режиме [0..100%]
037END_VAR
038
039VAR
040Kp :LReal := 1.0; // Пропорциональный коэффициентKp
041Ki :LReal := 1.0; // Интегральный коэффициентKi
042Kd :LReal := 1.0; // Дифференциальный коэффициентKd
043PASS_NO: USInt := 0; // Счётчик проходов для автонастройки [0-2]
044
045 e: STRUCT // Ошибки регулирования в различные моменты времени
046t :LReal; // Ошибка регулированияetв момент времени t
047 t1:LReal; // Ошибка регулированияet-1в момент времени t-1
048 t2:LReal; // Ошибка регулированияet-2в момент времени t-2
049 t3:LReal; // Ошибка регулированияet-3в момент времени t-3
050 t4:LReal; // Ошибка регулированияet-4в момент времени t-4
051 sqr: LReal; // Ошибка регулированияв квадрате e2tв момент времени t
052END_STRUCT;
053
054 y: STRUCT // Управляющие переменные
055out: LReal; // Внутренняяуправляющая переменная yt [0..100%]
056END_STRUCT;
057
058 d: STRUCT // Дифференциалы 1-го порядка
059 e :LReal; // Дифференциал1-го порядка detошибки регулированияet
060Kp :LReal; // Шаг адаптации dKpпропорционального коэффициентаKp
061Ki :LReal; // Шаг адаптации dKiинтегрального коэффициентаKi
062Kd :LReal; // Шаг адаптации dKdдифференциального коэффициентаKd
063 y :LReal; // Изменение управляющей переменной dyt+1для момента времени t+1
064 y_t1: LReal; // Изменение управляющей переменной dyt на предыдущем цикле
065END_STRUCT;
066
067 d2: STRUCT // Дифференциалы 2-го порядка
068 e :LReal; // Дифференциал 2-го порядка d2etошибки регулированияet
069 y :LReal; // Дифференциал 2-го порядка d2yt управляющей переменной yt
070END_STRUCT;
071
072 d3: STRUCT // Дифференциалы 3-го порядка
073 e :LReal; // Дифференциал 3-го порядка d3etошибки регулированияet
074END_STRUCT;
075

```

```

076 a: STRUCT // Скорости адаптации параметров А-ПИД-регулятора
077Kp: LReal := 1.0; // Скорость адаптации  $a_p$  пропорционального коэффициента  $K_p$ 
078Ki: LReal := 1.0; // Скорость адаптации  $a_i$  интегрального коэффициента  $K_i$ 
079Kd: LReal := 1.0; // Скорость адаптации  $a_d$  дифференциального коэффициента  $K_d$ 
080END_STRUCT;
081
082T_TUN_MON: TON_TIME; // Таймер для отключения автонастройки А-ПИД-регулятора
083END_VAR
084
085VAR TEMP
086LT_CYCLE: LTime; // Время дискретизации  $dt$  А-ПИД-регулятора
087Ts :LReal; // Время дискретизации  $dt$  А-ПИД-регулятора [с]
088dKp :LReal; // Шаг изменения пропорционального коэффициента  $K_p$ 
089dKi :LReal; // Шаг изменения интегрального коэффициента  $K_i$ 
090dKd :LReal; // Шаг изменения дифференциального коэффициента  $K_d$ 
091a_mx_Kp :LReal; // Верхний предел скорости адаптации  $a_p$  параметра  $K_p$ 
092 a_mx_Ki :LReal; // Верхний предел скорости адаптации  $a_i$  параметра  $K_i$ 
093 a_mx_Kd :LReal; // Верхний предел скорости адаптации  $a_d$  параметра  $K_d$ 
094 fact_1 :LReal; // Множитель 1 в уравнении
095 fact_2 :LReal; // Множитель 2 в уравнении
096divisor :LReal; // Делитель в уравнении
097
098 r: STRUCT // Параметры времени в секундах
099TI: LReal; // Постоянная времени интегрирования  $T_i$  [с]
100TD: LReal; // Постоянная времени дифференцирования  $T_d$  [с]
101END_STRUCT;
102END_VAR
103
104VAR CONSTANT
105GAIN_MN :LReal := 0.01; // Нижний предел пропорционального коэффициента  $K_p$ 
106GAIN_MX :LReal := 30.0; // Верхний предел пропорционального коэффициента  $K_p$ 
107TI_MX :LTime := LT#100M; // Верхний предел постоянной времени интегриров.  $T_i$ 
108TD_MX :LTime := LT#1M; // Верхний предел постоянной времени дифференц.  $T_d$ 
109LMN_MN :LReal := 0.0; // Нижний предел управляющей переменной  $y_t$  [%]
110LMN_MX :LReal := 100.0; // Верхний предел управляющей переменной  $y_t$  [%]
111TUN_ACCURACY :LReal := 1.0E-07; // Точность вычислений во время автонастройки
112TUN_ERR_TOLER_MN: LReal := 0.0; // Нижний предел условия отключения автонастройки
113TUN_ERR_TOLER_MX: LReal := 100.0; // Верхний предел условия отключения автонастройки
114TUN_COMPL_TM_MN :Time := T#1S; // Нижний предел задержки отключения автонастройки
115TUN_COMPL_TM_MX :Time := T#1M; // Верхний предел задержки отключения автонастройки
116CF_MN :LReal := 0.0001; // Нижний предел скорости адаптации параметров
117CF_MX :LReal := 1.0; // Верхний предел скорости адаптации параметров
118END_VAR
119
120BEGIN
121 //Сбросить код ошибки А-ПИД-регулятора
122 #ERR_CODE := 0;
123
124IF #CYCLE < T#10MS OR #CYCLE > T#10S THEN
125 //E01 = Время дискретизации CYCLE вне диапазона [10мс..10с]
126 #ERR_CODE := 1;
127 #y.out := 0.0;
128ELSEIF #LMN_LLM > #LMN_HLM THEN
129 //E02 = Нижний предел управляющей переменной LMN_LLM > верхнего предела LMN_HLM
130 #ERR_CODE := 2;
131 #y.out := 0.0;
132ELSEIF #LMN_LLM < #LMN_MN THEN
133 //E03 = Нижний предел управляющей переменной LMN_LLM < 0%
134 #ERR_CODE := 3;
135 #y.out := 0.0;
136ELSEIF #LMN_HLM > #LMN_MX THEN
137 //E04 = Верхний предел управляющей переменной LMN_HLM > 100%
138 #ERR_CODE := 4;
139 #y.out := 0.0;
140ELSE
141 //Преобразовать время дискретизации  $dt$  в секунды
142 #Ts := DINT_TO_LREAL(TIME_TO_DINT(#CYCLE)) / 1000.0;
143
144 //Преобразовать время дискретизации  $dt$  в IEC-время высокого разрешения
145 #LT_CYCLE := TIME_TO_LTIME(#CYCLE);
146
147 //Проверка допустимых значений параметров А-ПИД-регулятора
148#GAIN := LIMIT(IN := #GAIN, MN := #GAIN_MN, MX := #GAIN_MX);
149 #TI := LIMIT(IN := #TI, MN := #LT_CYCLE, MX := #TI_MX);
150 #TD := LIMIT(IN := #TD, MN := LT#0NS, MX := #TD_MX);
151 #TUN_ERR_TOLER := LIMIT(IN := #TUN_ERR_TOLER, MN := #TUN_ERR_TOLER_MN,
152MX := #TUN_ERR_TOLER_MX);
153 #TUN_COMPL_TM := LIMIT(IN := #TUN_COMPL_TM, MN := #TUN_COMPL_TM_MN,
154MX := #TUN_COMPL_TM_MX);
155 #LMN_MAN := LIMIT(IN := #LMN_MAN, MN := #LMN_MN, MX := #LMN_MX);

```

```

156
157 //Сохранить предыдущие ошибки регулирования
158 #e.t4 := #e.t3;
159 #e.t3 := #e.t2;
160 #e.t2 := #e.t1;
161 #e.t1 := #e.t;
162
163 //Вычислить ошибку регулирования, согласно заданному направлению регулирования
164 IF #INV_CONTROL THEN
165 #e.t := #PV - #SP;
166 ELSE
167 #e.t := #SP - #PV;
168 END IF;
169
170 //Вывести текущую ошибку регулирования ec
171 IF #INV_CONTROL THEN
172 #CTRL_ERR := -#e.t;
173 ELSE
174 #CTRL_ERR := #e.t;
175 END IF;
176
177 //Активировать А-ПИД-регулятор в автоматическом режиме
178 IF #AUTO_ON AND NOT #MAN_ON THEN
179 //Условие отключения автонастройки А-ПИД-регулятора
180 #T_TUN_MON(IN := #SELF_TUN_ON AND ABS(#e.t) <= #TUN_ERR_TOLER, PT := #TUN_COMPL_TM);
181 IF #T_TUN_MON.Q THEN
182 #SELF_TUN_ON := FALSE;
183 #PASS_NO := 0;
184 END IF;
185
186 //Преобразовать постоянную времени интегрирования Ti в секунды
187 #r.TI := LINT_TO_LREAL(LTIME_TO_LINT(#TI)) / 1.0E+9;
188
189 //Вычислить интегральный коэффициент Ki
190 #Ki := #GAIN / #r.TI;
191
192 //Преобразовать постоянную времени дифференцирования Td в секунды
193 #r.TD := LINT_TO_LREAL(LTIME_TO_LINT(#TD)) / 1.0E+9;
194
195 //Вычислить дифференциальный коэффициент Kd
196 #Kd := #GAIN * #r.TD;
197
198 //Сохранить текущее значение пропорционального коэффициента Kp
199 #Kp := #GAIN;
200
201 (*****
202 * НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ А-ПИД-РЕГУЛЯТОРА *
203 *****)
204 IF #SELF_TUN_ON AND ABS(#e.t4) > 0.0 AND ABS(#d.y_t1) > 0.0 THEN
205 //Вычислить дифференциал 2-го порядка d2y управляющей переменной yc
206 #d2.y := #d.y - #d.y_t1;
207
208 //Вычислить дифференциал 1-го порядка de ошибки регулирования ec
209 #d.e := #e.t - #e.t1;
210
211 //Вычислить дифференциал 2-го порядка d2e ошибки регулирования ec
212 #d2.e := #e.t - 2.0 * #e.t1 + #e.t2;
213
214 //Вычислить дифференциал 3-го порядка d3e ошибки регулирования ec
215 #d3.e := #e.t - 3.0 * #e.t1 + 3.0 * #e.t2 - #e.t3;
216
217 //Вычислить верхние пределы скоростей адаптации параметров ПИД-регулятора
218 #e.sqr := #e.t * #e.t;
219 #a_mx_Kp := LIMIT(IN := #e.sqr * #e.sqr / 2.71828, MN := #CF_MN, MX := #CF_MX);
220 #a_mx_Ki := LIMIT(IN := 4.0 * ABS(#e.sqr * #e.t) / 2.71828, MN := #CF_MN, MX := #CF_MX);
221 #a_mx_Kd := LIMIT(IN := ABS(#e.t * #e.sqr * #e.sqr) / 13.5914, MN := #CF_MN, MX := #CF_MX);
222
223 (*****
224 * НАСТРОЙКА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ *
225 *****)
226 //Выполнить автонастройку пропорционального коэффициента Kp
227 IF #PASS_NO = 0 THEN
228 //Вычислить шаг адаптации dKp пропорционального коэффициента Kp
229 IF ABS(#d.e) > #TUN_ACCURACY THEN
230 #fact_1 := #d2.y - #Ki * #d.e * #Ts - #Kd * #d3.e / #Ts;
231 #fact_2 := #d.y - #Ki * #e.t * #Ts - #Kd * #d2.e / #Ts;
232 #d.Kp := (#fact_1 * #d.e - #fact_2 * #d2.e) / (#d.e * #d.e);
233 ELSE
234 #d.Kp := 0.0;

```

```

236END_IF;
237
238      //Вычислить скорость адаптации  $a_p$  пропорционального коэффициента  $K_p$ 
239      #divisor := #d.Kp * #d.e;
240IF ABS(#divisor) > #TUN_ACCURACY THEN
241  #a.Kp := (#Kp * #d.e + #Kd * #d2.e / #Ts - #d.y) * #Ts / #divisor;
242#d.Kp := LIMIT(IN := #a.Kp, MN := #CF_MN, MX := #a_mx_Kp);
243ELSE
244#d.Kp := #CF_MN;
245END_IF;
246
247      //Адаптировать пропорциональный коэффициент  $K_p$ 
248#dKp := LIMIT(IN := #a.Kp * #d.Kp, MN := -0.5, MX := 0.5);
249#GAIN := LIMIT(IN := #GAIN - #dKp, MN := #GAIN_MN, MX := #GAIN_MX);
250#Kp := #GAIN;
251END_IF;
252
253 (*****
254*          НАСТРОЙКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ          *
255*****
256      //Выполнить автонастройку интегрального коэффициента  $K_i$ 
257IF #PASS_NO = 1 THEN
258      //Вычислить шаг адаптации  $dK_i$  интегрального коэффициента  $K_i$ 
259IF ABS(#e.t) > #TUN_ACCURACY THEN
260  #fact_1 := #d2.y - #Kp * #d2.e - #Kd * #d3.e / #Ts;
261  #fact_2 := #d.y - #Kp * #d.e - #Kd * #d2.e / #Ts;
262  #d.Ki := (#fact_1 * #e.t - #fact_2 * #d.e) / (#e.t * #e.t * #Ts);
263ELSE
264  #d.Ki := 0.0;
265END_IF;
266
267//Вычислить скорость адаптации  $a_i$  интегрального коэффициента  $K_i$ 
268  #divisor := #d.Ki * #e.t;
269IF ABS(#divisor) > #TUN_ACCURACY THEN
270  #a.Ki := (#d.y - #Ki * #e.t * #Ts - #Kd * #d2.e / #Ts) * #Ts / #divisor;
271  #a.Ki := LIMIT(IN := #a.Ki, MN := #CF_MN, MX := #a_mx_Ki);
272ELSE
273  #a.Ki := #CF_MN;
274END_IF;
275
276      //Адаптировать интегральный коэффициент  $K_i$ 
277  #dKi := LIMIT(IN := #a.Ki * #d.Ki, MN := -0.5, MX := 0.5);
278#Ki := LIMIT(IN := #Ki + #dKi,
279MN := #GAIN * 1.0E+9 / LINT_TO_LREAL(LTIME_TO_LINT(#TI_MX)),
280MX := #GAIN / #Ts);
281
282//Преобразовать интегральный коэффициент  $K_i$  во время интегрирования  $T_i$  [с]
283  #r.TI := #GAIN / #Ki;
284
285      //Преобразовать время интегрирования в IEC-время высокого разрешения
286  #TI := LINT_TO_LTIME(LREAL_TO_LINT(#r.TI * 1.0E+9));
287END_IF;
288
289 (*****
290*          НАСТРОЙКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ          *
291*****
292      //Выполнить автонастройку дифференциального коэффициента  $K_d$ 
293IF #PASS_NO = 2 THEN
294      //Вычислить шаг адаптации  $dK_d$  дифференциального коэффициента  $K_d$ 
295IF ABS(#d2.e) > #TUN_ACCURACY THEN
296  #fact_1 := #d2.y - #Kp * #d2.e - #Ki * #d.e * #Ts;
297  #fact_2 := #d.y - #Kp * #d.e - #Ki * #e.t * #Ts;
298  #d.Kd := (#fact_1 * #d2.e - #fact_2 * #d3.e) * #Ts / (#d2.e * #d2.e);
299ELSE
300  #d.Kd := 0.0;
301END_IF;
302
303//Вычислить скорость адаптации  $a_d$  дифференциального коэффициента  $K_d$ 
304  #divisor := #d.Kd * #d2.e;
305IF ABS(#divisor) > #TUN_ACCURACY THEN
306  #a.Kd := (#Kp * #d.e + #Kd * #d2.e / #Ts - #d.y) * #Ts * #Ts / #divisor;
307  #a.Kd := LIMIT(IN := #a.Kd, MN := #CF_MN, MX := #a_mx_Kd);
308ELSE
309  #a.Kd := #CF_MN;
310END_IF;
311
312      //Адаптировать дифференциальный коэффициент  $K_d$ 
313  #dKd := LIMIT(IN := #a.Kd * #d.Kd, MN := -0.5, MX := 0.5);
314#Kd := LIMIT(IN := #Kd - #dKd, MN := 0.0,
315MX := #GAIN * LINT_TO_LREAL(LTIME_TO_LINT(#TD_MX)) / 1.0E+9);

```

```

316
317//Преобразовать дифференциальный коэффициент  $K_d$  во время дифференцир.  $T_d$  [с]
318      #r.TD := #Kd / #GAIN;
319
320      //Преобразовать время дифференцирования в IEC-время высокого разрешения
321      #TD := LINT_TO_LTIME(LREAL_TO_LINT(#r.TD * 1.0e+9));
322END_IF;
323
324      //Увеличить на 1 счётчик проходов автонастройки
325      #PASS_NO := #PASS_NO + 1;
326
327      //Сбросить счётчик проходов автонастройки, если превышает 2
328IF #PASS_NO > 2 THEN
329      #PASS_NO := 0;
330END_IF;
331ELSE
332#PASS_NO := 0;
333END_IF;
334
335(*****
336*          УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДОМ          *
337*****
338      //Сохранить изменение управляющей переменной  $dy_t$  предыдущего цикла
339      #d.y_t1 := #d.y;
340
341//Вычислить изменение управляющей переменной  $dy_{t+1}$  для момента времени  $t+1$ 
342      #d.y := (#Kp + #Ki * #Ts + #Kd / #Ts) * #e.t - (#Kp + 2.0 * #Kd / #Ts) * #e.t1 +
343      #Kd / #Ts * #e.t2;
344
345      //Адаптировать управляющую переменную  $y_t$ 
346#y.out := LIMIT(IN := #y.out + #d.y, MN := #LMN_LLM, MX := #LMN_HLM);
347ELSE
348IF #MAN_ON THEN
349//Управление приводом в ручном режиме
350      #y.out := LIMIT(IN := #LMN_MAN, MN := #LMN_MN, MX := #LMN_MX);
351ELSE
352      //Сбросить управляющую переменную  $y_t$  в режиме бездействия А-ПИД-регулятора
353      #y.out := #LMN_MN;
354END_IF;
355      //Инициализировать внутренние переменные А-ПИД-регулятора
356      #d.y := #d.y_t1 := 0.0;
357      #e.t := #e.t1 := #e.t2 := #e.t3 := 0.0;
358      #PASS_NO := 0;
359END_IF;
360END_IF;
361
362//Перенести текущее значение управляющей переменной  $y_t$  в переменную для ручного режима
363#LMN_MAN := #y.out;
364
365//Вывести текущее значение управляющей переменной  $y_t$ 
366#LMN := #y.out;
367
368END_FUNCTION_BLOCK

```

Литература

- [1] Vladimir Bobal et. al., "AUTO-TUNING OF DIGITAL PID CONTROLLERS USING RECURSIVE IDENTIFICATION", *Adaptive systems in Control and Signal Processing*, June 16,1995 (1995-06-16), pp. 359-364, XP055754038, Great Britain, ISBN:978-0-08-042375-3.
- [2] Sukede Abhijeet Kishorsingh et al., "Auto tuning of PID controller", *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)*, IEEE, May 28-30, 2015, pp. 1459-1462, XP033170865.
- [3] "Three Types of PID Equations", <http://bestune.50megs.com/typeABC.htm>
- [4] Lutz H., Wendt W., "Taschenbuch der Regelungstechnik mit MATLAB und Simulink", 10., *ergänzte Auflage*, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2014.
- [5] International standard IEC 61131-3:2013. Programmable controllers - Part 3: Programming languages.
- [6] Lin Feng, Brandt Robert D., Saikalis George, "Self-tuning of PID Controllers by Adaptive Interaction", *Proceedings of the 2000 American Control Conference*, pp. 3676-3681.
- [7] Y. Chen et al., "Design of PID Controller of Feed Servo-System Based on Intelligent Fuzzy Control", *Key Engineering Materials*, Vol. 693, pp. 1728-1733, 2016.
- [8] X. Wang et al., "Simulation Research of CNC Machine Servo System Based on Adaptive Fuzzy Control", *Advanced Materials Research*, Vol. 819, pp. 181-185, 2013.
- [9] T. Boone et al., "PID Controller Tuning Based on the Guardian Map Technique", *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, Vol. 9, pp.192-196, 2015.
- [10] Dipraj, Dr. A. K. Pandey, "Speed Control of D.C. Servo Motor By Fuzzy Controller", *International Journal of Scientific & Technology Research*, Vol. 1, Issue 8, pp. 139-142, 2012.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. В современной промышленности ПИД-регулятор является составной частью системы автоматического управления, где важными особенностями являются простота решения и экономия вычислительных ресурсов. В настоящее время наиболее предпочтительным методом автоматической настройки ПИД-регулятора является механизм нечёткого логического вывода, который позволяет получать результат с высоким качеством решения. Но данный метод решения отличается высокой вычислительной нагрузкой математического аппарата и сильной привязкой к управляемому объекту.

Настоящий метод адаптивной настройки предполагает универсальность использования цифрового ПИД-регулятора без привязки к определённому управляемому объекту и характеризуется низкой вычислительной нагрузкой, которая обеспечивается использованием нескольких математических уравнений для настройки каждого из трёх параметров ПИД-регулятора. Важной особенностью данного метода настройки параметров ПИД-регулятора, т.е. пропорционального K_p , интегрального K_i и дифференциального K_d коэффициентов, является их циклическая адаптивная настройка со смещением во времени, когда в каждый момент времени t изменяется только один из параметров ПИД-регулятора. Чтобы подчеркнуть дискретность данного метода, параметр времени t принимает значения временного множества в виде k , m или n ,

т. е. $t \in \{0, \dots, k-1, m-1, n-1, k, m, n, k+1, m+1, n+1, \dots, +\infty\}$. Причём на временном шаге $k-1$, k или $k+1$ изменяется только параметр K_p , на временном шаге $m-1$, m или $m+1$ изменяется только параметр K_i , а на временном шаге $n-1$, n или $n+1$ изменяется только параметр K_d . Затем изменённые параметры K_p , K_i и K_d вместе с ошибкой регулирования, т.е. разностью между уставкой и переменной процесса, подаются в уравнение цифрового ПИД-регулятора для вычисления новой управляющей переменной. Такой подход позволяет значительно снизить вычислительную нагрузку на промышленный контроллер. Вычислительный процесс повторяется для последующих временных шагов до тех пор, пока ошибка регулирования не достигнет заданного порогового значения.

2. Адаптивная настройка пропорционального коэффициента K_p цифрового ПИД-регулятора осуществляется на временном шаге k (т. е. параметр времени $t = k$) согласно уравнению (15):

$$K_{p\,k} = K_{p\,k-1} - \alpha_{p\,k} \cdot dK_{p\,k} , \quad (15)$$

$$\alpha_{pk} \cdot dK_{pk} \in [-0,5, +0,5].$$

где:

K_{pk} – пропорциональный коэффициент на временном шаге k ;

K_{pk-1} – пропорциональный коэффициент на временном шаге $k-1$;

α_{pk} – скорость адаптации пропорционального коэффициента K_p на временном шаге k ;

dK_{pk} – шаг адаптации параметра K_p на временном шаге k .

Шаг адаптации dK_{pk} вычисляется на текущем временном шаге k в соответствии с уравнением (16):

$$dK_{pk} = \frac{\left(d^2 y_t - K_{i_{m-1}} \cdot de_t \cdot dt - K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt}\right) \cdot de_t}{(de_t)^2} - \frac{\left(dy_t - K_{i_{m-1}} \cdot e_t \cdot dt - K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt}\right) \cdot d^2 e_t}{(de_t)^2}. \quad (16)$$

где:

dy_t – изменение управляющей переменной y_t в момент времени t , которое определяется как $dy_t = y_t - y_{t-1}$, $dy_{t \leq 0} = 0$;

y_t – управляющая переменная в момент времени t , $y_{t \leq 0} = 0$;

y_{t-1} – управляющая переменная в момент времени $t-1$, $y_{t-1} = 0, \forall t \in \{0, 1\}$;

$d^2 y_t$ – дифференциал 2-го порядка управляющей переменной y_t в момент времени t , который вычисляется как $d^2 y_t = dy_t - dy_{t-1}$;

dy_{t-1} – изменение управляющей переменной в момент времени $t-1$, $dy_{t-1} = 0, \forall t \in \{0, 1\}$;

dt – время дискретизации T_s цифрового ПИД-регулятора, напр., $T_s = 0,1$ с;

e_t – ошибка регулирования в момент времени t , которая вычисляется как $e_t = w - x_t$;

w – уставка;

x_t – переменная процесса в момент времени t ;

de_t – дифференциал 1-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $de_t = e_t - e_{t-1}$;

$d^2 e_t$ – дифференциал 2-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $d^2 e_t = e_t - 2 \cdot e_{t-1} + e_{t-2}$;

$d^3 e_t$ – дифференциал 3-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t ,
который вычисляется как $d^3 e_t = e_t - 3 \cdot e_{t-1} + 3 \cdot e_{t-2} - e_{t-3}$;

e_{t-1} – ошибка регулирования в момент времени $t-1$;

e_{t-2} – ошибка регулирования в момент времени $t-2$;

e_{t-3} – ошибка регулирования в момент времени $t-3$;

K_{im-1} – интегральный коэффициент на временном шаге $m-1$;

K_{dn-1} – дифференциальный коэффициент на временном шаге $n-1$.

Скорость адаптации α_{pk} вычисляется на временном шаге k согласно уравнению (17):

$$\alpha_{pk} = \frac{K_{pk-1} \cdot de_t + K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} - dy_t}{dK_{pk} \cdot de_t} \cdot dt, \quad (17)$$

$$\alpha_{pk} \in \left[0,0001, \frac{e_t^4}{2} \in [0,0001, 1] \right]$$

Описание параметров для уравнения (17) смотри в описаниях к уравнениям (15) и (16).

3. Адаптивная настройка интегрального коэффициента K_i цифрового ПИД-регулятора осуществляется на временном шаге m (т. е. параметр времени $t = m$) согласно уравнению (18):

$$K_{im} = K_{im-1} + \alpha_{im} \cdot dK_{im}, \quad (18)$$

$$\alpha_{im} \cdot dK_{im} \in [-0,5, +0,5].$$

где:

K_{im} – интегральный коэффициент на временном шаге m ;

K_{im-1} – интегральный коэффициент на временном шаге $m-1$;

α_{im} – скорость адаптации интегрального коэффициента K_i на временном шаге m ;

dK_{im} – шаг адаптации параметра K_i на временном шаге m .

Шаг адаптации dK_{im} вычисляется на текущем временном шаге m в соответствии с уравнением (19):

$$dK_{im} = \frac{(d^2 y_t - K_{pk} \cdot d^2 e_t - K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt}) \cdot e_t}{e_t^2 \cdot dt} \quad (19)$$

$$\frac{\left(dy_t - K_{pk} \cdot de_t - K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt}\right) \cdot de_t}{e_t^2 \cdot dt},$$

где:

K_{pk} – пропорциональный коэффициент на временном шаге k .

Описание остальных параметров смотри в описании к уравнению (16) в пункте 2 формулы изобретения.

Скорость адаптации α_{im} вычисляется на временном шаге m согласно уравнению (20):

$$\alpha_{im} = \frac{dy_t - K_{im-1} \cdot e_t \cdot dt - K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt}}{dK_{im} \cdot e_t} \cdot dt, \quad (20)$$

$$\alpha_{im} \in \left[0,0001, \frac{e_t^2}{2} \in [0,0001, 1]\right]$$

Описание параметров для уравнения (20) смотри в описаниях к уравнению (18) и к уравнению (16) в пункте 2 формулы изобретения.

4. Адаптивная настройка дифференциального коэффициента K_d цифрового ПИД-регулятора осуществляется на временном шаге n (т. е. параметр времени $t = n$) согласно уравнению (21):

$$K_{dn} = K_{dn-1} - \alpha_{dn} \cdot dK_{dn}, \quad (21)$$

$$\alpha_{dn} \cdot dK_{dn} \in [-0,5, +0,5].$$

где:

K_{dn} – дифференциальный коэффициент на временном шаге n ;

K_{dn-1} – дифференциальный коэффициент на временном шаге $n-1$;

α_{dn} – скорость адаптации дифференциального коэффициента K_d на временном шаге n ;

dK_{dn} – шаг адаптации параметра K_d на временном шаге n .

Шаг адаптации dK_{dn} вычисляется на текущем временном шаге n в соответствии с уравнением (22):

$$dK_{dn} = \left(\frac{(d^2 y_t - K_{pk} \cdot d^2 e_t - K_{im} \cdot de_t \cdot dt) \cdot d^2 e_t}{(d^2 e_t)^2} - \frac{(dy_t - K_{pk} \cdot de_t - K_{im} \cdot e_t \cdot dt) \cdot d^2 e_t}{(d^2 e_t)^2} \right) \cdot dt. \quad (22)$$

где:

K_{pk} – пропорциональный коэффициент на временном шаге k ;

K_{im} – интегральный коэффициент на временном шаге m .

Описание остальных параметров смотри в описании к уравнению (16) в пункте 2 формулы изобретения.

Скорость адаптации α_{dn} вычисляется на временном шаге n согласно уравнению (23):

$$\alpha_{dn} = \frac{K_{pk} \cdot de_t + K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} - dy_t}{dK_{dn} \cdot d^2 e_t} \cdot dt^2. \quad (23)$$

$$\alpha_{dn} \in \left[0,0001, \frac{e_t^6}{2} \in [0,0001, 1] \right]$$

Описание параметров для уравнения (23) смотри в описаниях к уравнениям (21), (22) и к уравнению (16) в пункте 2 формулы изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Метод адаптивной настройки параметров цифрового ПИД-регулятора, который характеризуется использованием девяти уравнений настройки, выведенных через обратный инжиниринг ПИД-регулятора.

2. Метод адаптивной настройки параметров цифрового ПИД-регулятора согласно пункту 1, который характеризуется адаптивной настройкой параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора в следующем:

- адаптивная настройка осуществляется отдельно во времени в замкнутом контуре управления при помощи счётчика проходов и трёх дополнительных индексов k для K_p , m для K_i и n для K_d , используемых в качестве итерационных шагов, для адаптации только одного параметра ПИД-регулятора в каждый момент времени t ;
- раздельная адаптация ПИД-параметров во времени обусловлена выведенными уравнениями настройки.

3. Метод адаптивной настройки параметров цифрового ПИД-регулятора согласно пункту 2, который характеризуется тем, что адаптивная настройка параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора осуществляется циклически через равные промежутки времени и состоит из следующей последовательности шагов:

S01: Старт

S02: Сбросить в 0 индекс времени t и установить счётчик времени на 0 секунд

S03: Сбросить в 0 итерационный шаг k для K_p

S04: Сбросить в 0 итерационный шаг m для K_i

S05: Сбросить в 0 итерационный шаг n для K_d

S06: Установить пропорциональный коэффициент K_p на начальное значение при $k=0$

S07: Установить интегральный коэффициент K_i на начальное значение при $m=0$

S08: Установить дифференциальный коэффициент K_d на начальное значение при $n=0$

S09: Увеличить на 1 итерационный шаг k для K_p

S10: Увеличить на 1 итерационный шаг m для K_i

S11: Увеличить на 1 итерационный шаг n для K_d

S12: Сбросить в 0 счётчик проходов

- S13:** Сбросить в 0 управляющую переменную y_t в момент времени t
- S14:** Сбросить в 0 изменение управляющей переменной dy_t в момент времени t
- S15:** Сбросить в 0 изменение управляющей переменной dy_{t+1} для момента времени $t+1$
- S16:** Увеличить индекс времени t на 1 и увеличить счётчик времени на время дискретизации dt
- S17:** Вычислить текущую ошибку регулирования e_t между уставкой w и переменной процесса x_t в момент времени t как $e_t = w - x_t$
- S18:** Если индекс времени t превысил значение 3, то перейти к шагу S19, иначе перейти обратно к шагу S13
- S19:** Если абсолютное значение ошибки регулирования e_t опустилось ниже заданного порога, то перейти к шагу S41, иначе перейти к шагу S20
- S20:** Оценить значение счётчика проходов в диапазоне от 0 до 2: если его значение равно 0, то перейти к шагу S21; если его значение равно 1, то перейти к шагу S25; или если его значение равно 2, то перейти к шагу S29
- S21:** Вычислить шаг адаптации dK_p пропорционального коэффициента K_p в момент времени t на итерационном шаге k :

$$dK_{p_k} = \frac{\left(d^2 y_t - K_{i_{m-1}} \cdot de_t \cdot dt - K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt}\right) \cdot de_t}{(de_t)^2} - \frac{\left(dy_t - K_{i_{m-1}} \cdot e_t \cdot dt - K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt}\right) \cdot d^2 e_t}{(de_t)^2}.$$

где:

$d^2 y_t$ – дифференциал 2-го порядка управляющей переменной y_t в момент времени t , который вычисляется как $d^2 y_t = dy_t - dy_{t-1}$;

de_t – дифференциал 1-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $de_t = e_t - e_{t-1}$;

$d^2 e_t$ – дифференциал 2-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $d^2 e_t = e_t - 2 \cdot e_{t-1} + e_{t-2}$;

$d^3 e_t$ – дифференциал 3-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $d^3 e_t = e_t - 3 \cdot e_{t-1} + 3 \cdot e_{t-2} - e_{t-3}$;

$K_{i_{m-1}}$ – интегральный коэффициент K_i в момент времени t , который был адаптирован на итерационном шаге $m-1$;

$K_{d_{n-1}}$ – дифференциальный коэффициент K_d в момент времени t , который был адаптирован на итерационном шаге $n-1$

S22: Вычислить скорость адаптации α_{p_k} пропорционального коэффициента K_p в момент времени t на итерационном шаге k :

$$\alpha_{p_k} = \frac{K_{p_{k-1}} \cdot de_t + K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} - dy_t}{dK_{p_k} \cdot de_t} \cdot dt,$$

$$\alpha_{p_k} \in \left[0,0001, \frac{e_t^4}{2,71828} \in [0,0001, 1] \right],$$

где:

$K_{p_{k-1}}$ – пропорциональный коэффициент K_p в момент времени t , который был адаптирован на итерационном шаге $k-1$

S23: Адаптировать пропорциональный коэффициент K_p на итерационном шаге k :

$$K_{p_k} = K_{p_{k-1}} - \alpha_{p_k} \cdot dK_{p_k},$$

$$\alpha_{p_k} \cdot dK_{p_k} \in [-0,5, +0,5]$$

S24: Перейти к шагу S32

S25: Вычислить шаг адаптации dK_i интегрального коэффициента K_i в момент времени t на итерационном шаге m :

$$dK_{i_m} = \frac{\left(d^2 y_t - K_{p_k} \cdot d^2 e_t - K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} \right) \cdot e_t}{e_t^3 \cdot dt} - \frac{\left(dy_t - K_{p_k} \cdot de_t - K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} \right) \cdot de_t}{e_t^3 \cdot dt}$$

S26: Вычислить скорость адаптации α_{i_m} интегрального коэффициента K_i в момент времени t на итерационном шаге m :

$$\alpha_{i_m} = \frac{dy_t - K_{i_{m-1}} \cdot e_t \cdot dt - K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt}}{dK_{i_m} \cdot e_t} \cdot dt,$$

$$\alpha_{i_m} \in \left[0,0001, \frac{4 \cdot |e_t^3|}{2,71828} \in [0,0001, 1] \right]$$

S27: Адаптировать интегральный коэффициент K_i на итерационном шаге m :

$$K_{i_m} = K_{i_{m-1}} + \alpha_{i_m} \cdot dK_{i_m}.$$

$$\alpha_{i_m} \cdot dK_{i_m} \in [-0,5, +0,5]$$

S28: Перейти к шагу S32

S29: Вычислить шаг адаптации dK_d дифференциального коэффициента K_d в момент времени t на итерационном шаге n :

$$dK_{d_n} = \left(\frac{(d^2 y_t - K_{p_k} \cdot d^2 e_t - K_{i_m} \cdot de_t \cdot dt) \cdot d^2 e_t}{(d^2 e_t)^2} - \frac{(dy_t - K_{p_k} \cdot de_t - K_{i_m} \cdot e_t \cdot dt) \cdot d^2 e_t}{(d^2 e_t)^2} \right) \cdot dt$$

S30: Вычислить скорость адаптации α_{d_n} дифференциального коэффициента K_d в момент времени t на итерационном шаге n :

$$\alpha_{d_n} = \frac{K_{p_k} \cdot de_t + K_{d_{n-1}} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} - dy_t}{dK_{d_n} \cdot d^2 e_t} \cdot dt^2,$$

$$\alpha_{d_n} \in \left[0,0001, \frac{|e_t^2|}{13,5914} \in [0,0001, 1] \right]$$

S31: Адаптировать дифференциальный коэффициент K_d на итерационном шаге n :

$$K_{d_n} = K_{d_{n-1}} - \alpha_{d_n} \cdot dK_{d_n}.$$

$$\alpha_{d_n} \cdot dK_{d_n} \in [-0,5, +0,5]$$

S32: Увеличить на 1 счётчик проходов

S33: Если значение счётчика проходов меньше 3, то перейти к шагу S38, иначе перейти к шагу S34

S34: Увеличить на 1 итерационный шаг k для K_p

S35: Увеличить на 1 итерационный шаг m для K_i

S36: Увеличить на 1 итерационный шаг n для K_d

S37: Сбросить в 0 счётчик проходов

S38: Вычислить изменение управляющей переменной dy_{t+1} для момента времени $t+1$ согласно скоростному алгоритму цифрового ПИД-регулятора, используя текущие значения параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора для момента времени t :

$$dy_{t+1} = \left(K_p + K_i \cdot dt + \frac{K_d}{dt} \right) \cdot e_t - \left(K_p + 2 \cdot \frac{K_d}{dt} \right) \cdot e_{t-1} + \frac{K_d}{dt} \cdot e_{t-2}$$

S39: Адаптировать управляющую переменную y_t для момента времени t :

$$y_t = y_{t-1} + dy_{t+1}$$

S40: Перейти к шагу S16

S41: Конец.

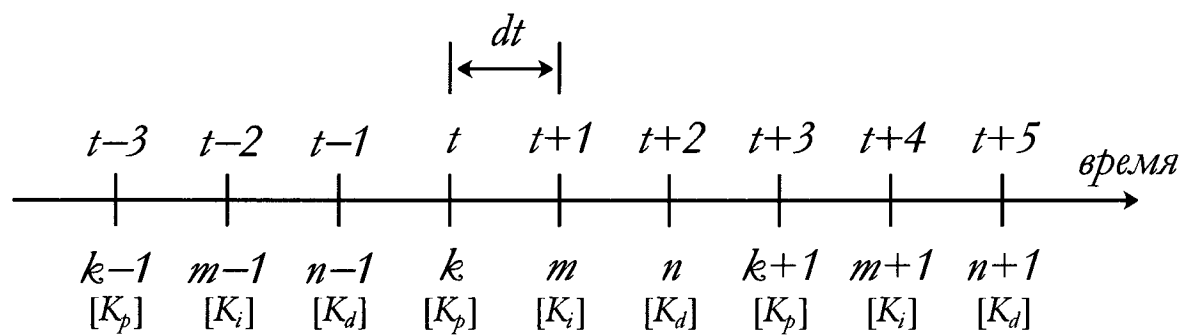
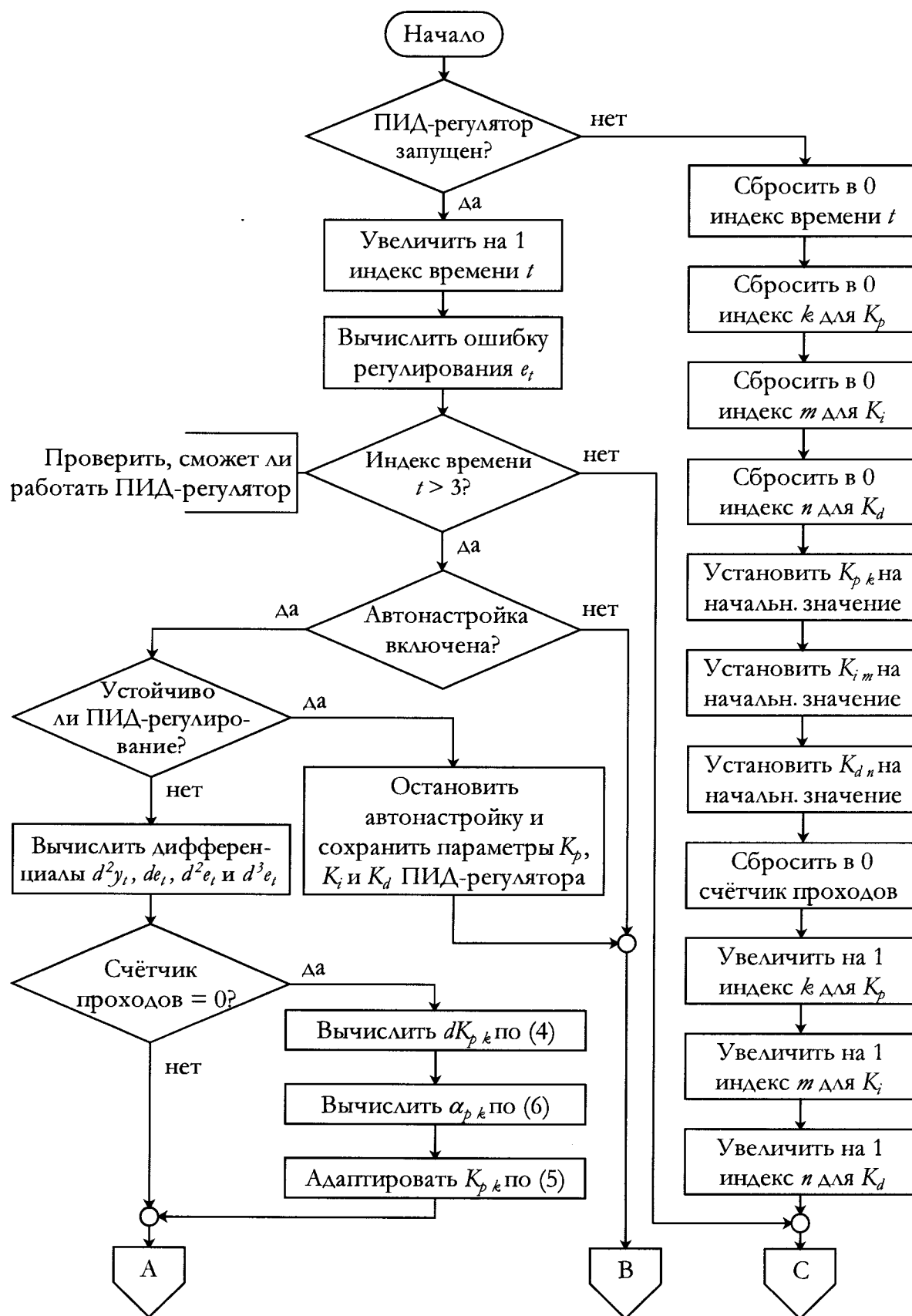


Рис. 1



Фиг. 2А

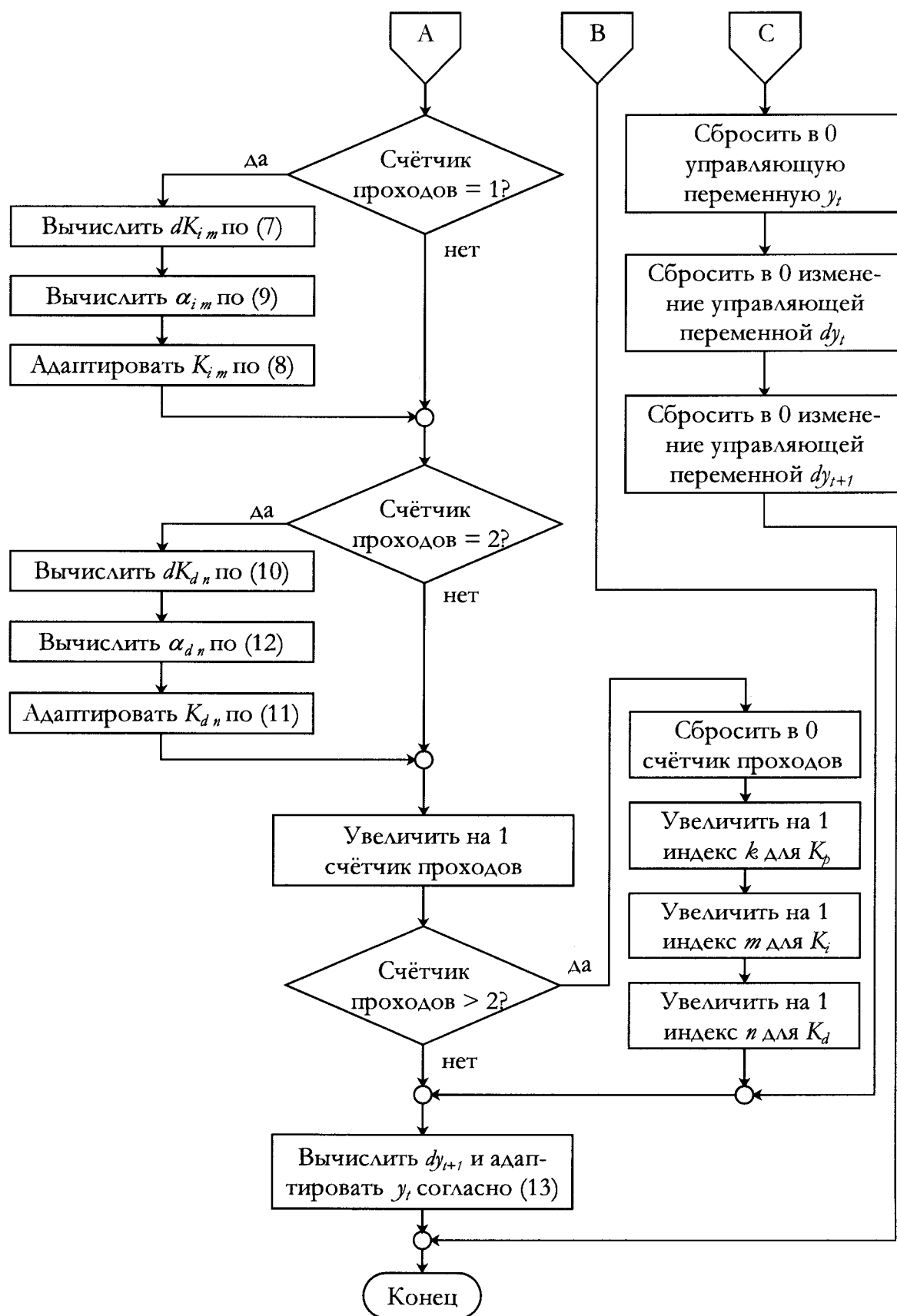
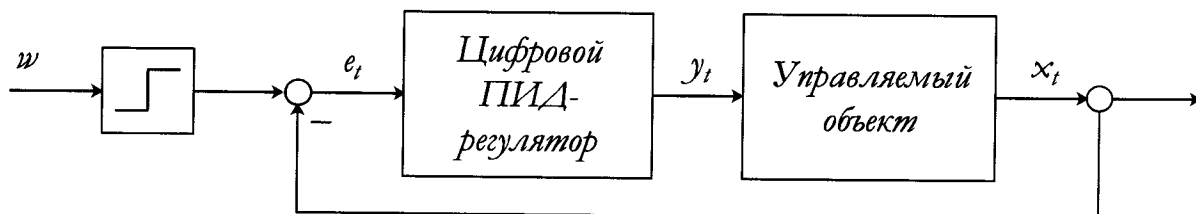
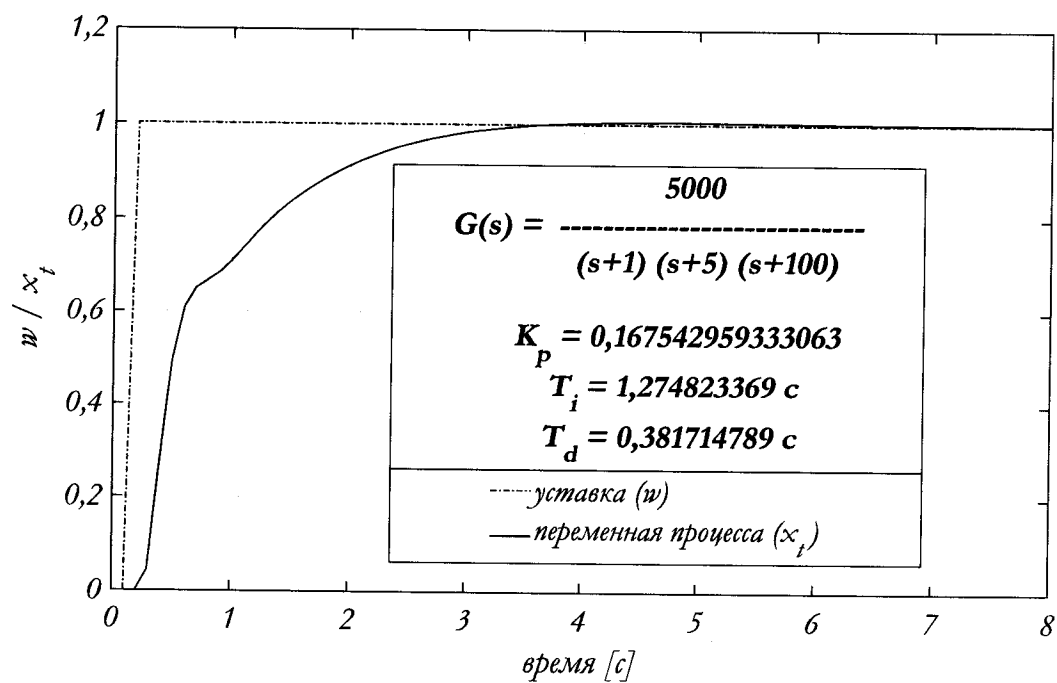


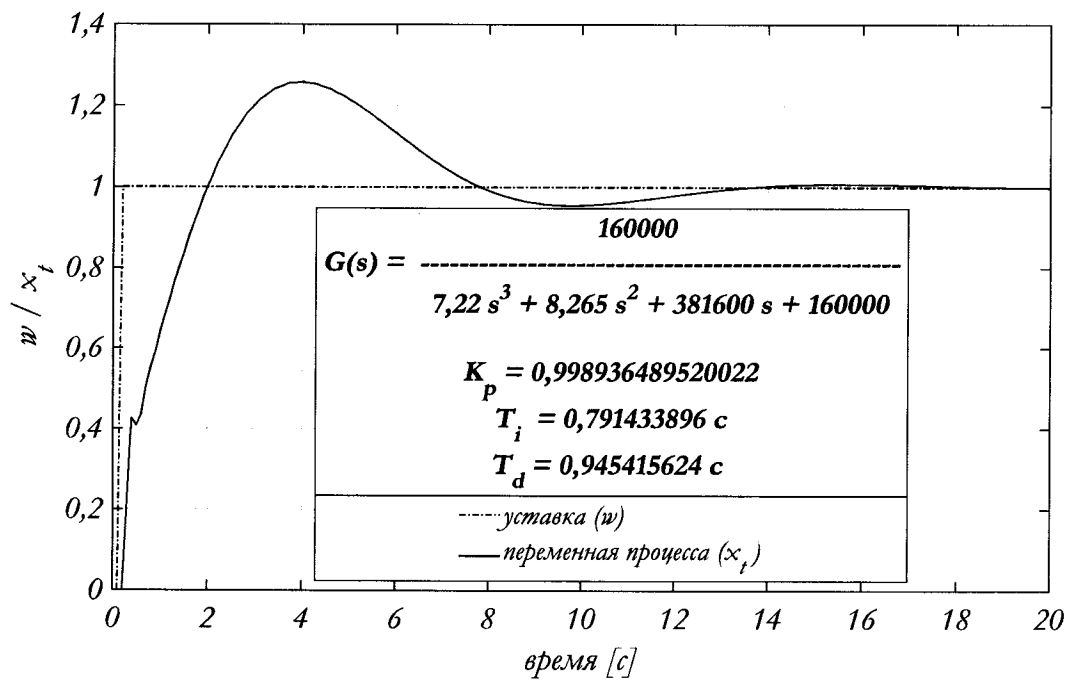
Рис. 2В



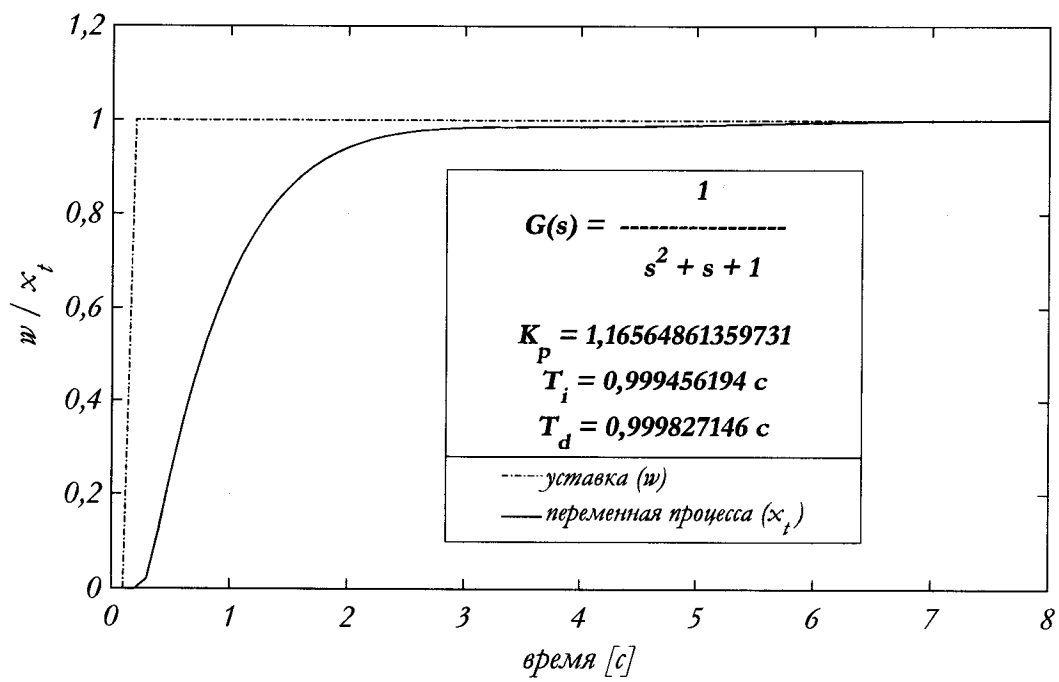
Фиг. 3



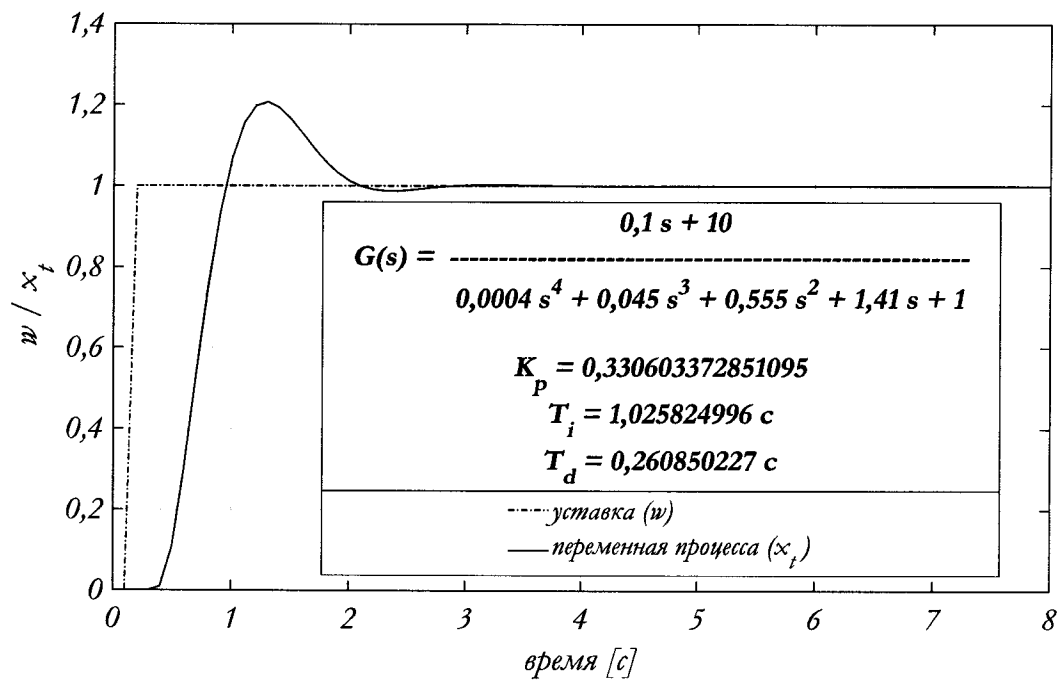
Фиг. 4



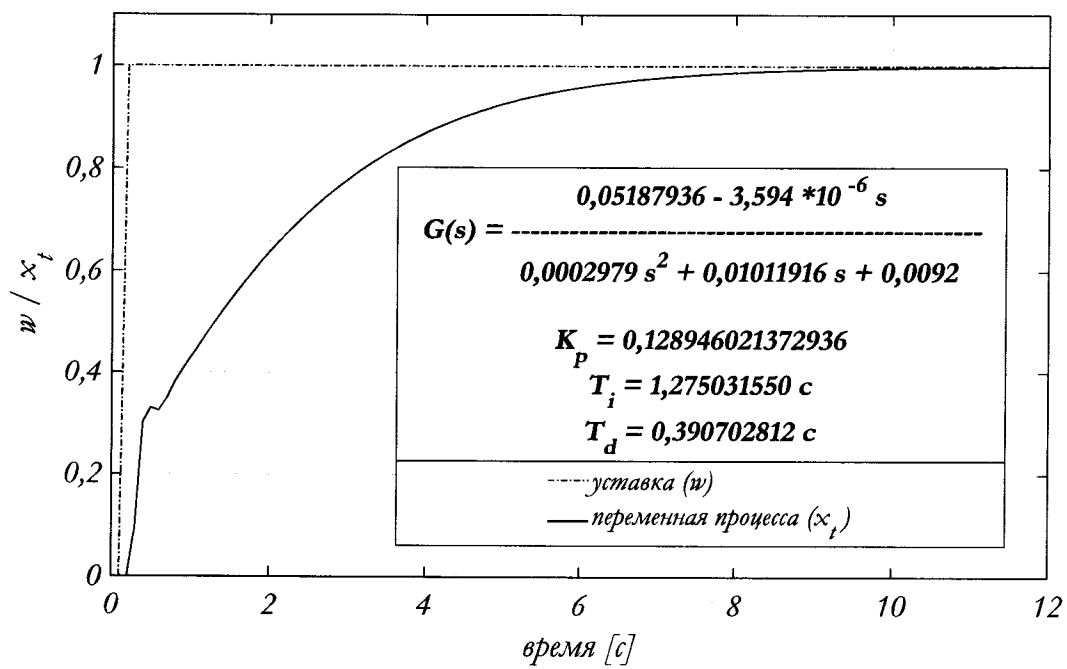
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8