

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **042710**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2023.03.17

(51) Int. Cl. **G05B 13/02** (2006.01)

(21) Номер заявки
202200084

(22) Дата подачи заявки
2019.12.27

(54) МЕТОД АДАПТИВНОЙ НАСТРОЙКИ ЦИФРОВОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

(43) **2022.11.30**

(86) **PCT/DE2019/000338**

(87) **WO 2020/094169 2020.05.14**

(71)(72)(73) Заявитель, изобретатель и патентовладелец:

ДИМАКОВ ВАЛЕНТИН (DE)

(74) Представитель:

Гаврилова Е.А. (RU)

(56) Vladimir Bobaj ET AL. "AUTO-TUNING OF DIGITAL PID CONTROLLERS USING RECURSIVE IDENTIFICATION" Adaptive systems in Control and Signal Processing, GREAT BRITAIN, 16 June 1995 (1995-06-16), page 359, Retrieved from the Internet: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)45376-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)45376-6) [retrieved on 2020-11-30] DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)45376-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)45376-6). XP055754038, page 360 - page 361

SUKEDE ABHIJEET KISHORSINGH ET AL. "Auto tuning of PID controller" 2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INSTRUMENTATION AND CONTROL (ICIC), IEEE, 28 May 2015 (2015-05-28), pages 1459-1462, DOI: 10.1109/IC.2015.7150979, XP033170865, page 1460

(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 раздельно 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. фиг. 1). 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.

B1

042710

042710 B1

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 объем газа в каком-нибудь сегменте промышленной установки. Это может быть достигнуто с помощью ПИД-регулятора, который доказал свою надежность 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 настройка 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 изобретения по данной теме часто отдают предпочтение методам автоматической настройки ПИД-регулятора с использованием механизма нечеткого 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 нечеткого логического вывода. ПЛК обычно выполняют различные задачи по автоматизации технологических процессов и для этого могут одновременно использовать большое количество ПИД-регуляторов; если механизм нечеткого логического вывода будет постоянно использоваться для изменения управляющих переменных, то совокупная вычислительная нагрузка может оказаться очень высокой даже для современных ПЛК;

привязка к определенной задаче, т.е. набор правил нечеткого логического вывода, также как параметры функций для фаззификации и дефаззификации, подбираются под решение четко 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 раздельно 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 трех 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:

способ 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 способа не требует предварительной оценки управляемого объекта и построения его математической модели; это подразумевает универсальность его использования, так как нет привязки к определенному управляемому объекту.

Возможное ограничение при использовании: сходимость способа 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 фигур

Все особенности, которые подчеркивают 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 способа адаптивной настройки ПИД-регулятора (начало);
- фиг. 2В - блок-схема способа 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 интеграла, представленного в ПИД-регуляторе в явном виде. Это достигается путем 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 трех параметров ПИД-регулятора в каждый момент времени t . Чтобы максимально упростить метод вывода уравнений настройки, два из трех 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:

$$dy_t = K_{pk} \cdot de_t + K_{im} \cdot e_t \cdot dt + K_{dn} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} \quad (3)$$

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

$$dK_{pk} = \frac{\left(d^2 y_t - K_{im-1} \cdot de_t \cdot dt - K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} \right) \cdot de_t}{(de_t)^2} - \frac{\left(dy_t - K_{im-1} \cdot e_t \cdot dt - K_{dn-1} \cdot \frac{d^2 e_t}{dt} \right) \cdot d^2 e_t}{(de_t)^2} \quad (4)$$

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 $d^3 e_t = e_{t-3} \cdot e_{t-1} + 3 \cdot e_{t-2} \cdot e_{t-3}$;

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

K_{dn-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:

$$K_{pk} = K_{pk-1} - \alpha_{pk} \cdot dK_{pk}, \quad (5)$$

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

где

K_{pk-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 :

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

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

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

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

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

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} :

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

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

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 :

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

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

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

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

$$\alpha_{d_n} \cdot dK_{d_n} \in [-0,5, +0,5].$$
(11)

где

α_{d_n} - 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_{d_n} 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_{d_n} :

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

$$\alpha_{d_n} \in \left[0,0001, \frac{|e_t^2|}{13,5914} \in [0,0001, 1] \right]$$
(12)

Данное уравнение характеризуется дополнительным ограничением параметра α_{d_n} 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 способа адаптивной настройки (см. [4], стр. 1085):

$$y_t = y_{t-1} + dy_{t+1} =$$
(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: непосредственное интегрирование ошибок регулирования 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, изображенная 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

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

№	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	$G(z) = \frac{0,1464 + 0,3096 z^{-1} + 0,02883 z^{-2}}{1 - 0,9475 z^{-1} + 0,03348 z^{-2}}$

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

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 табл. 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 осуществлялось 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 5 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 //Цифровой ПИД-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)
014 AUTO_ON : Bool := FALSE; // Активировать автоматический режим регулирования
015 INV_CONTROL: Bool := FALSE; // Направление регулирования (0=SP>PV, 1=PV>SP)
016 CYCLE : Time := T#100MS; // Время дискретизации dtA-ПИД-регулятора [10мс..10с]
017 SP : LReal := 0.0; // Уставка w <температура, давление и т.д.>
018 PV : LReal := 0.0; // Переменная процесса x_t <температура, давление и т.д.>
019 LMN_LLM : LReal := 0.0; // Нижний предел управляющей переменной y_t [0..99%]
020 LMN_HLM : LReal := 100.0; // Верхний предел управл. переменной y_t [LMN_LLM..100%]
021END_VAR
022
023VAR_OUTPUT
024CTRL_ERR: LReal := 0.0; // Ошибка регулирования e_t
025 LMN : LReal := 0.0; // Управляющая переменная y_t [0..100%]
026 ERR_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 K_p [0,01..30]
032TI : LTime := LT#1S; // Постоянная времени интегрирования T_i [CYCLE..100m]
033 TD : LTime := LT#1S; // Постоянная времени дифференцирования T_d [0..60с]
034 TUN_ERR_TOLER: LReal := 0.01; // Порог для отключения автонастройки [0..100]
035 TUN_COMPL_TM : Time := T#3S; // Задержка перед отключением автонастройки [1с..1m]
036 LMN_MAN : LReal := 0.0; // Управляющая переменная в ручном режиме [0..100%]
037END_VAR
038
039VAR
040 Kp : LReal := 1.0; // Пропорциональный коэффициент K_p
041 Ki : LReal := 1.0; // Интегральный коэффициент K_i
042 Kd : LReal := 1.0; // Дифференциальный коэффициент K_d
043 PASS_NO: USInt := 0; // Счётчик проходов для автонастройки [0-2]
044
045 e: STRUCT // Ошибки регулирования в различные моменты времени
046 t : LReal; // Ошибка регулирования e_t в момент времени t
047 t1: LReal; // Ошибка регулирования e_{t-1} в момент времени t-1
048 t2: LReal; // Ошибка регулирования e_{t-2} в момент времени t-2
049 t3: LReal; // Ошибка регулирования e_{t-3} в момент времени t-3
050 t4: LReal; // Ошибка регулирования e_{t-4} в момент времени t-4
051 sqr: LReal; // Ошибка регулирования в квадрате e_t^2 в момент времени t
052END_STRUCT;
053
054 y: STRUCT // Управляющие переменные
055 out: LReal; // Внутренняя управляющая переменная y_t [0..100%]
056END_STRUCT;
057
058 d: STRUCT // Дифференциалы 1-го порядка
059 e : LReal; // Дифференциал 1-го порядка de_t ошибки регулирования e_t
060 Kp : LReal; // Шаг адаптации dK_p пропорционального коэффициента K_p
061 Ki : LReal; // Шаг адаптации dK_i интегрального коэффициента K_i
062 Kd : LReal; // Шаг адаптации dK_d дифференциального коэффициента K_d
063 y : LReal; // Изменение управляющей переменной dy_{t+1} для момента времени t+1
064 y_t1: LReal; // Изменение управляющей переменной dy_t на предыдущем цикле
065END_STRUCT;
066
067 d2: STRUCT // Дифференциалы 2-го порядка
068 e : LReal; // Дифференциал 2-го порядка d^2e_t ошибки регулирования e_t
069 y : LReal; // Дифференциал 2-го порядка d^2y_t управляющей переменной y_t
070END_STRUCT;

```

```

071
072 d3: STRUCT // Дифференциалы 3-го порядка
073 e: LReal; // Дифференциал 3-го порядка  $d^3e_t$  ошибки регулирования  $e_t$ 
074END_STRUCT;
075
076 a: STRUCT // Скорости адаптации параметров А-ПИД-регулятора
077 Kp: LReal := 1.0; // Скорость адаптации  $a_p$  пропорционального коэффициента  $K_p$ 
078 Ki: LReal := 1.0; // Скорость адаптации  $a_i$  интегрального коэффициента  $K_i$ 
079 Kd: LReal := 1.0; // Скорость адаптации  $a_d$  дифференциального коэффициента  $K_d$ 
080END_STRUCT;
081
082 T_TUN_MON: TON_TIME; // Таймер для отключения автонастройки А-ПИД-регулятора
083END_VAR
084
085VAR_TEMP
086 LT_CYCLE: LTime; // Время дискретизации dtА-ПИД-регулятора
087 Ts : LReal; // Время дискретизации dtА-ПИД-регулятора[с]
088 dKp : LReal; // Шаг изменения пропорционального коэффициента  $K_p$ 
089 dKi : LReal; // Шаг изменения интегрального коэффициента  $K_i$ 
090 dKd : LReal; // Шаг изменения дифференциального коэффициента  $K_d$ 
091 a_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
096 divisor : LReal; // Делитель в уравнении
097
098 r: STRUCT // Параметры времени в секундах
099 TI: LReal; // Постоянная времени интегрирования  $T_i$ [с]
100 TD: LReal; // Постоянная времени дифференцирования  $T_d$ [с]
101END_STRUCT;
102END_VAR
103
104VAR CONSTANT
105GAIN_MN : LReal := 0.01; // Нижний предел пропорционального коэффициента  $K_p$ 
106 GAIN_MX : LReal := 30.0; // Верхний предел пропорционального коэффициента  $K_p$ 
107 TI_MX : LTime := LT#100M; // Верхний предел постоянной времени интегриров.  $T_i$ 
108 TD_MX : LTime := LT#1M; // Верхний предел постоянной времени дифференц.  $T_d$ 
109 LMN_MN : LReal := 0.0; // Нижний предел управляющей переменной  $y_t$ [%]
110 LMN_MX : LReal := 100.0; // Верхний предел управляющей переменной  $y_t$ [%]
111 TUN_ACCURACY : LReal := 1.0E-07; // Точность вычислений во время автонастройки
112 TUN_ERR_TOLER_MN: LReal := 0.0; // Нижний предел условия отключения автонастройки
113 TUN_ERR_TOLER_MX: LReal := 100.0; // Верхний предел условия отключения автонастройки
114 TUN_COMPL_TM_MN : Time := T#1S; // Нижний предел задержки отключения автонастройки
115 TUN_COMPL_TM_MX : Time := T#1M; // Верхний предел задержки отключения автонастройки
116 CF_MN : LReal := 0.0001; // Нижний предел скорости адаптации параметров
117 CF_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;
128ELSIF #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;
132ELSIF #LMN_LLM < #LMN_MN THEN
133 //E03 = Нижний предел управляющей переменной LMN_LLM < 0%
134 #ERR_CODE := 3;
135 #y.out := 0.0;
136ELSIF #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#ONS, 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 et согласно заданному направлению регулирования
164IF #INV_CONTROL THEN
165#e.t := #PV - #SP;
166ELSE
167 #e.t := #SP - #PV;
168END_IF;
169
170 //Вывести текущую ошибку регулирования et
171IF #INV_CONTROL THEN
172 #CTRL_ERR := -#e.t;
173ELSE
174 #CTRL_ERR := #e.t;
175END_IF;
176
177 //Активировать А-ПИД-регулятор в автоматическом режиме
178IF #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);
181IF #T_TUN_MON.Q THEN
182 #SELF_TUN_ON := FALSE;
183 #PASS_NO := 0;
184END_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*****
204IF #SELF_TUN_ON AND ABS(#e.t4)> 0.0 AND ABS(#d.y_t1)> 0.0 THEN
205 //Вычислить дифференциал 2-го порядка d2yt управляющей переменной yt
206 #d2.y := #d.y - #d.y_t1;
207
208 //Вычислить дифференциал 1-го порядка det ошибки регулирования et
209 #d.e := #e.t - #e.t1;
210
211 //Вычислить дифференциал 2-го порядка d2et ошибки регулирования et
212 #d2.e := #e.t - 2.0 * #e.t1 + #e.t2;
213
214 //Вычислить дифференциал 3-го порядка d3et ошибки регулирования et
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,

```

```

221
222#a_mx_Kd := LIMIT(IN :=ABS(#e.t * #e.sqr * #e.sqr) / 13.5914, MN:=#CF_MN, MX := #CF_MX);
223
224 (*****
225* НАСТРОЙКА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ *
226*****
227 //Выполнить автонастройку пропорционального коэффициента Kp
228IF #PASS_NO = 0 THEN
229 //Вычислить шаг адаптации dKp пропорционального коэффициента Kp
230IFABS(#d.e)> #TUN_ACCURACY THEN
231 #fact_1 := #d2.y - #Ki * #d.e * #Ts - #Kd * #d3.e / #Ts;
232 #fact_2 := #d.y - #Ki * #e.t * #Ts - #Kd * #d2.e / #Ts;
233#d.Kp := (#fact_1 * #d.e - #fact_2 * #d2.e) / (#d.e * #d.e);
234ELSE
235#d.Kp := 0.0;
236END_IF;
237
238 //Вычислить скорость адаптации ap пропорционального коэффициента Kp
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#a.Kp := LIMIT(IN := #a.Kp, MN := #CF_MN, MX := #a_mx_Kp);
243ELSE
244#a.Kp := #CF_MN;
245END_IF;
246
247 //Адаптировать пропорциональный коэффициент Kp
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 Ki
257IF#PASS_NO = 1 THEN
258 //Вычислить шаг адаптации dKi интегрального коэффициента Ki
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 ai интегрального коэффициента Ki
268 #divisor := #d.Ki * #e.t;
269IFABS(#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 Ki
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 Ki во время интегрирования Ti [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 Kd
293IF #PASS_NO = 2 THEN
294 //Вычислить шаг адаптации dKd дифференциального коэффициента Kd
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  $du_t$  предыдущего цикла
339 #d.y_t1 := #d.y;
340
341//Вычислить изменение управляющей переменной  $du_{t+1}$  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 Bohal 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] Sukcde Abhijeet Kishorsingh et al.. "Auto tuning of PID controller", *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIIC)*, 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. Способ адаптивной настройки параметров цифрового ПИД-регулятора, который характеризуется циклической последовательностью операций для раздельной во времени настройки через равные промежутки времени только одного параметра K_p , K_i и K_d цифрового ПИД-регулятора в каждый момент времени t в замкнутом контуре управления по аналоговой обратной связи от переменной процесса x_t при помощи счетчика проходов и трех дополнительных индексов k для K_p , m для K_i и n для K_d , используемых в качестве итерационных шагов, и с использованием девяти уравнений настройки, выведенных через обратный инжиниринг ПИД-регулятора, а именно:

1) уравнения настройки для вычисления шага адаптации dK_{pk} пропорционального коэффициента K_p в момент времени t на итерационном шаге k :

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

где

dt - время дискретизации цифрового ПИД-регулятора;

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

$\forall t \geq 1$ при условии, что $dy_0 = y_0$;

$d^2 y_t$ - дифференциал 2-го порядка управляющей переменной y_t в момент времени t , который вычисляется как $d^2 y_t = dy_t - dy_{t-1}$, $\forall t \geq 1$ при условии, что $d^2 y_0 = dy_0$;

e_t - текущая ошибка регулирования между уставкой w и переменной процесса x_t в момент времени

t , которая вычисляется как $e_t = w - x_t, \forall t \geq 0$;

de_t - дифференциал 1-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $de_t = e_t - e_{t-1}, \forall t \geq 1$ при условии, что $de_0 = e_0$;

d^2e_t - дифференциал 2-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $d^2e_t = e_t - 2 \cdot e_{t-1} + e_{t-2}, \forall t \geq 2$ при условии, что $d^2e_0 = e_0$ и $d^2e_1 = e_1 - 2 \cdot e_0$;

d^3e_t - дифференциал 3-го порядка ошибки регулирования e_t в момент времени t , который вычисляется как $d^3e_t = e_t - 3 \cdot e_{t-1} + 3 \cdot e_{t-2} - e_{t-3}, \forall t \geq 3$ при условии, что $d^3e_0 = e_0, d^3e_1 = e_1 - 3 \cdot e_0$ и $d^3e_2 = e_2 - 3 \cdot e_1 + 3 \cdot e_0$;

K_{im-1} - интегральный коэффициент K_i в момент времени t который был адаптирован на итерационном шаге $m-1, \forall m > 1$ при условии, что K_{i0} присвоено заданное начальное значение для K_i ;

K_{dn-1} - дифференциальный коэффициент K_d в момент времени t , который был адаптирован на итерационном шаге $n-1, \forall n > 1$ при условии, что K_{d0} присвоено заданное начальное значение для K_d ;

2) уравнения настройки для вычисления скорости адаптации α_{pk} пропорционального коэффициента K_p в момент времени t на итерационном шаге k :

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

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

где

K_{pk-1} - пропорциональный коэффициент K_p в момент времени t , который был адаптирован на итерационном шаге $k-1, \forall k > 1$ при условии, что K_{p0} присвоено заданное начальное значение для K_p ;

3) уравнения настройки для адаптации пропорционального коэффициента K_p в отрицательном направлении на итерационном шаге k :

$$K_{pk} = K_{pk-1} - \alpha_{pk} \cdot dK_{pk},$$

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

4) уравнения настройки для вычисления шага адаптации dK_{im} интегрального коэффициента K_i в момент времени t на итерационном шаге m :

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

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

5) уравнения настройки для вычисления скорости адаптации α_{im} интегрального коэффициента K_i в момент времени t на итерационном шаге m :

$$\alpha_{im} = \frac{dy_t - K_{im-1} \cdot e_t \cdot dt - K_{dn-1} \cdot \frac{d^2e_t}{dt}}{dK_{im} \cdot e_t} \cdot dt.$$

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

6) уравнения настройки для адаптации интегрального коэффициента K_i в положительном направлении на итерационном шаге m :

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

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

7) уравнения настройки для вычисления шага адаптации dK_{d_n} дифференциального коэффициента K_d в момент времени t на итерационном шаге n :

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

8) уравнения настройки для вычисления скорости адаптации α_{d_n} дифференциального коэффициента K_d в момент времени t на итерационном шаге n :

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

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

9) уравнения настройки для адаптации дифференциального коэффициента K_d в отрицательном направлении на итерационном шаге n :

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

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

2. Способ адаптивной настройки параметров цифрового ПИД-регулятора по п.1, который характеризуется адаптивной настройкой параметров K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора в следующем:

адаптивная настройка осуществляется раздельно во времени в замкнутом контуре управления при помощи счетчика проходов и трех 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. Способ адаптивной настройки параметров цифрового ПИД-регулятора по п.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 счетчик времени на 0 с

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 счетчик проходов

S13: Сбросить в 0 управляющую переменную y_t в момент времени t

S14: Сбросить в 0 изменение управляющей переменной du_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 счетчик 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 счетчика 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_{pk} пропорционального коэффициента K_p в момент времени t на итерационном шаге k :

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

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_{pk} пропорционального коэффициента K_p в момент времени t на итерационном шаге k :

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

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

где

K_{pk-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 :

$$K_{pk} = K_{pk-1} - \alpha_{pk} \cdot dK_{pk} ,$$

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

S24: Перейти к шагу S32

S25: Вычислить шаг адаптации dK_{im} интегрального коэффициента K_i в момент времени t на итерационном шаге m :

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

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

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

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

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

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_n} дифференциального коэффициента K_d в момент времени t на итерационном шаге n :

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

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

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

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

$$\alpha_{d_n} \in \left[0,0001, \frac{|e_t^5|}{13,5914}\right] \in [0,0001, 1]$$

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 счетчик проходов

S33: Если значение счетчика 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 счетчик 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 :

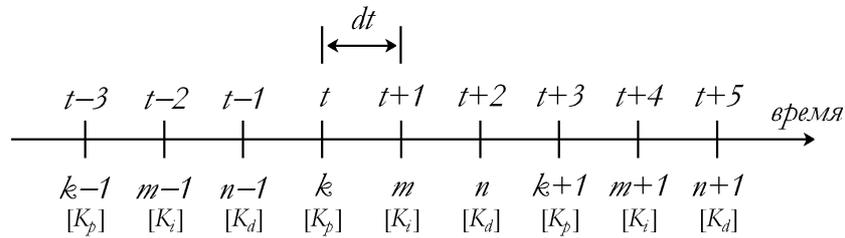
$$dy_{t+1} = \left(K_p + K_i \cdot dt + \frac{K_d}{dt} \right) \cdot e_t - \left(K_p + 2 \cdot \frac{K_d}{dt} \right) \cdot e_{t-1} + \frac{K_d}{dt} \cdot e_{t-2}$$

S39: Адаптировать управляющую переменную y_t для момента времени t :

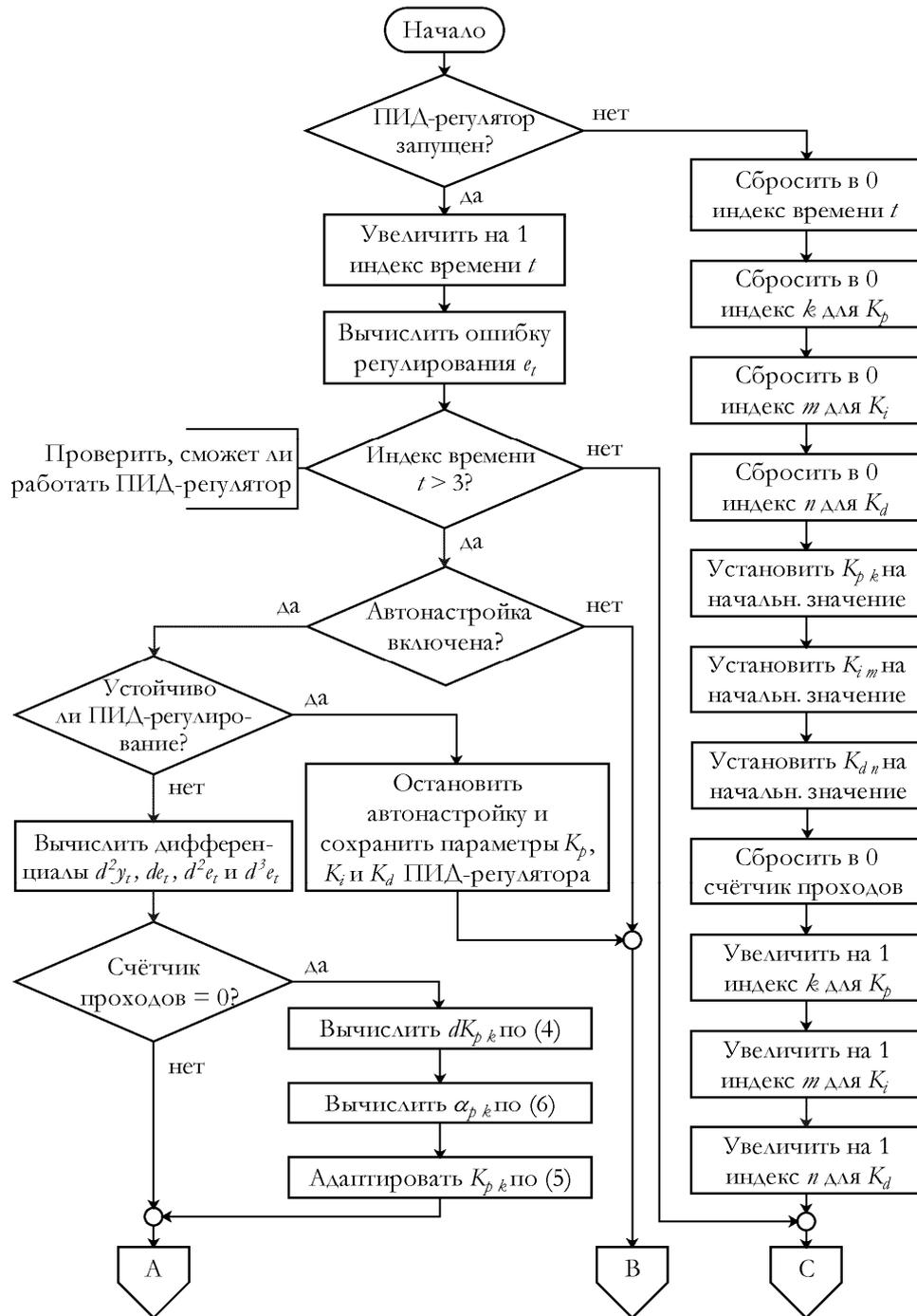
$$y_t = y_{t-1} + dy_{t+1}$$

S40: Перейти к шагу S16

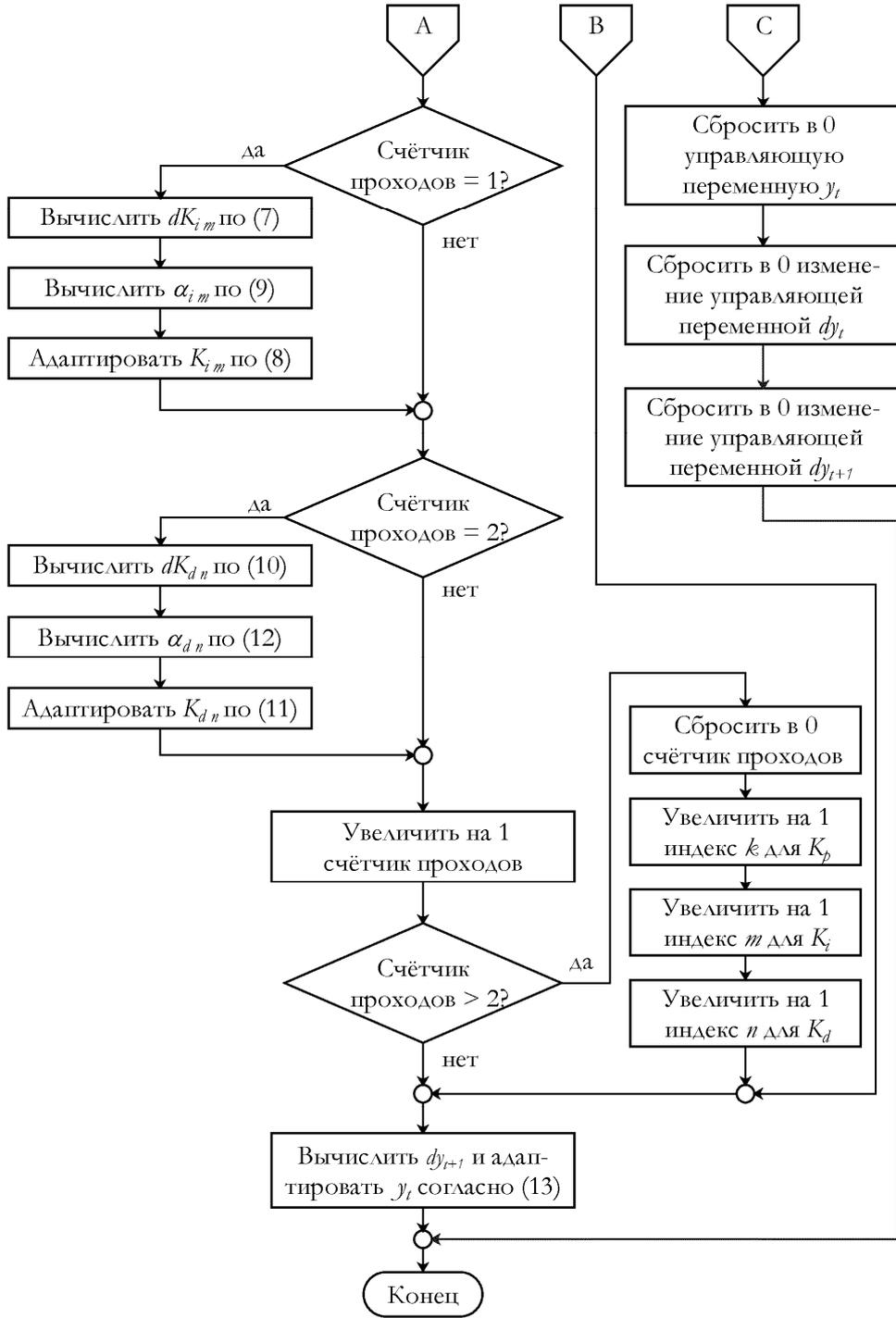
S41: Конец.



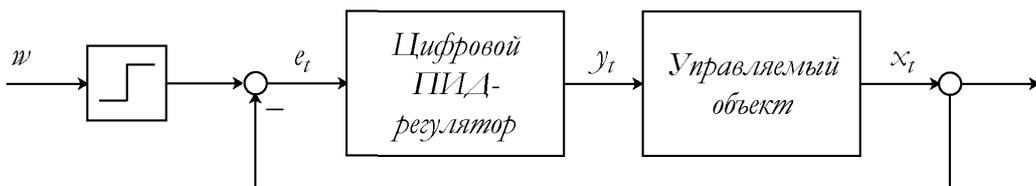
Фиг. 1



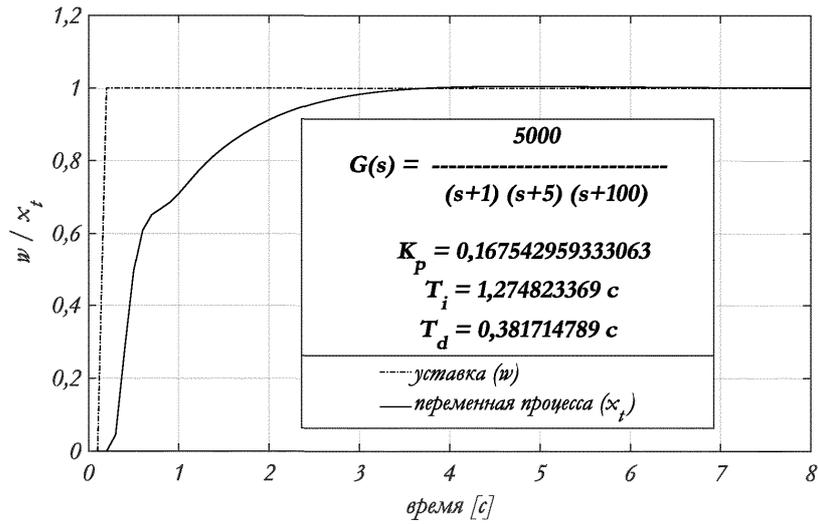
Фиг. 2А



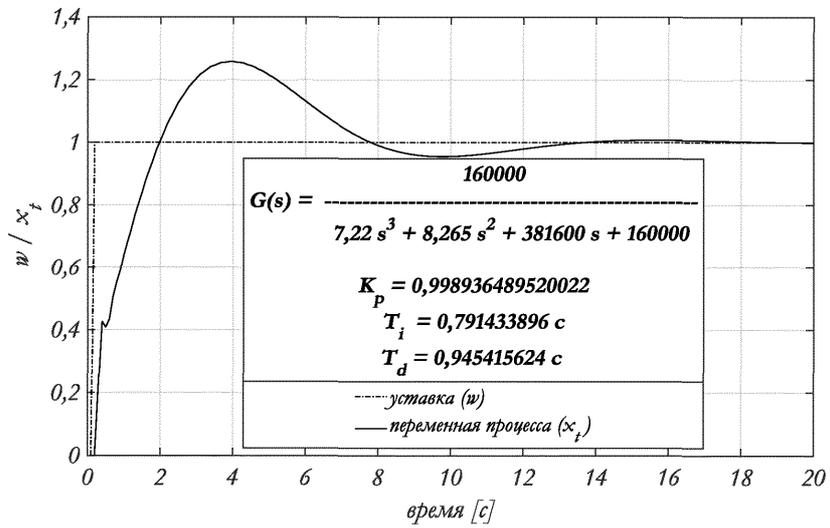
Фиг. 2B



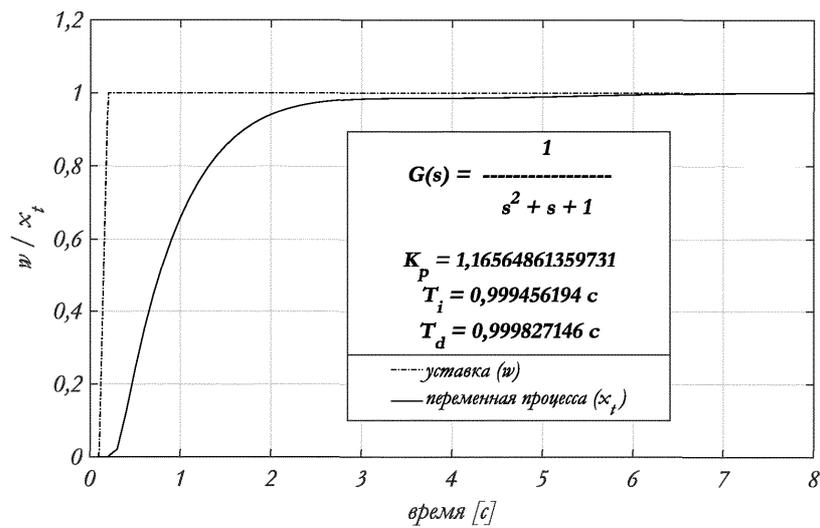
Фиг. 3



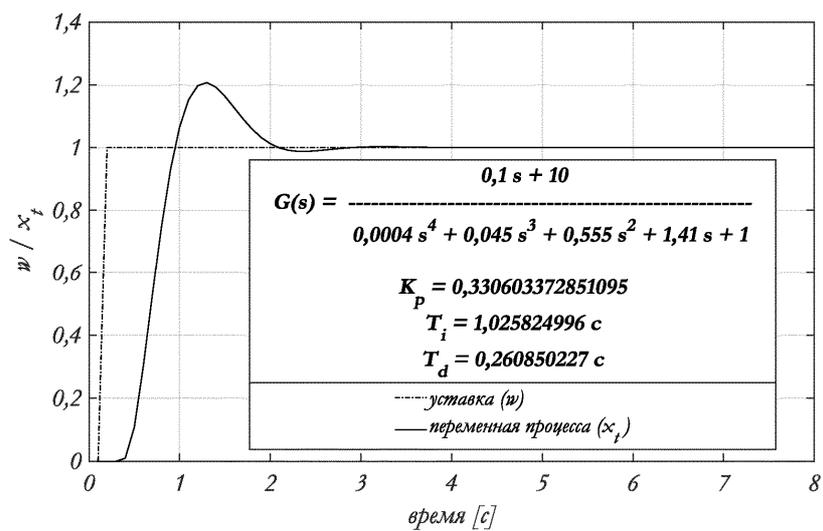
Фиг. 4



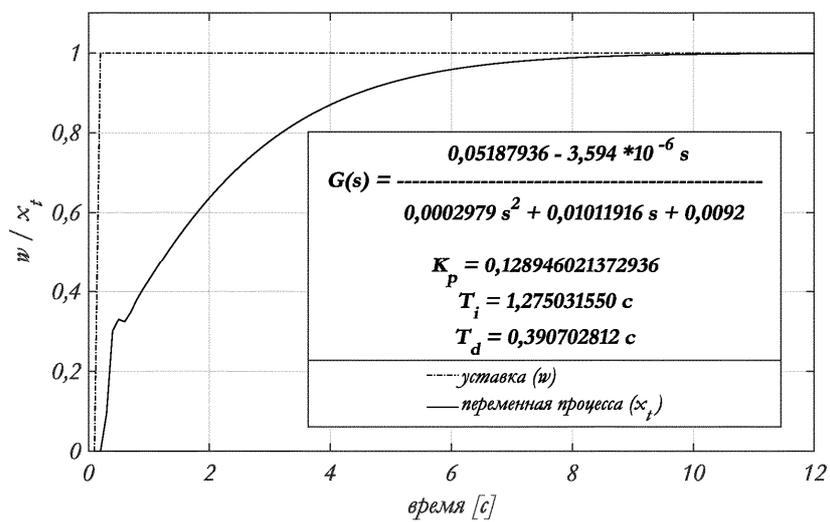
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8

