

# Просто о PID-регулировании

## А ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

В 1939 году приборостроительная компания Taylor представила новую версию своего пневматического контроллера Fulscope с функцией предварительного действия в дополнение к ранее доступным режимам пропорционального управления и сброса. В настоящее время три режима управления называются пропорциональным, интегральным (сброс) и дифференциальным (предварительное действие), следовательно, сокращённо PID. В отечественной литературе принята аббревиатура ПИД, означающая пропорционально-интегрально-дифференциальный режим. В том же году компания Foxboro Instrument добавила к ранее доступным в контроллере Stabilog режимам пропорциональности и сброса гиперсброс, что делает его вторым ПИД-регулятором на рынке. Сегодня все ПИД-регуляторы, в том числе и в системе Dataforth MAQ<sup>®</sup>20, основаны на тех самых пропорциональном, интегральном и производном (дифференциальном) режимах контроллеров, выпущенных в 1939 году (рис. 1).

ПИД-регуляторы используются в большинстве приложений автоматического управления процессами в промышленности. Они могут регулировать расход, температуру, давление, уровень и многие другие параметры производственных процессов. В статье рассматривается конструкция ПИД-регуляторов и объясняются используемые в них режимы управления P, I и D.

## РУЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

В отсутствие автоматических контроллеров все задачи регулирования приходится выполнять вручную. Например, для поддержания постоянной температуры воды, подогреваемой промышленным газовым нагревателем, оператор должен следить за датчиком температуры и соответствующим образом регулировать подачу газа при помощи клапана (рис. 2). Если температура воды по какой-либо причине становится слишком высокой, оператор должен немного закрыть газовый клапан на величину, достаточную, чтобы температура вернулась

к желаемому значению. Если вода становится слишком холодной, он должен приоткрыть газовый клапан.

## КОНТРОЛЬ И ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Процесс управления, реализуемый оператором, называется управлением с обратной связью, поскольку оператор изменяет силу пламени на основе обратной связи, которую он получает от процесса через датчик температуры. Управление с обратной связью может быть выполнено вручную, но обычно это происходит автоматически, как будет объяснено в следующем разделе. Клапан, процесс горения и датчик температуры образуют контур управления. Любое изменение, вносимое оператором в состояние газового клапана, влияет на температуру, значение которой становится доступно оператору, тем самым контур управления замыкается.

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Чтобы избавить оператора от утомительной задачи ручного управления, функцию управления можно автоматизировать с помощью ПИД-регулятора. Для этого требуется следующее: Установить электронное устройство измерения температуры. Автоматизировать клапан, добавив к нему исполнительный механизм (и, возможно, позиционер), чтобы клапаном можно было управлять электронным способом. Установить контроллер, например, ПИД-регулятор MAQ<sup>®</sup>20, и подключить к нему устройство измерения температуры и автоматизированный клапан управления. Более подробная информация о PID-регуляторе Dataforth MAQ<sup>®</sup>20 представлена во врезке.

ПИД-регулятор имеет уставку (*SP* – Set Point), чтобы оператор мог задать значение температуры. Выходной сигнал контроллера (*CO* – Controller Output) устанавливает положение регулирующего клапана. А значение измеренной температуры, называемое параметром регулирования процесса (или переменной процесса, *PV* – Process Variable), даёт контроллеру столь необходимую обратную связь. Переменная

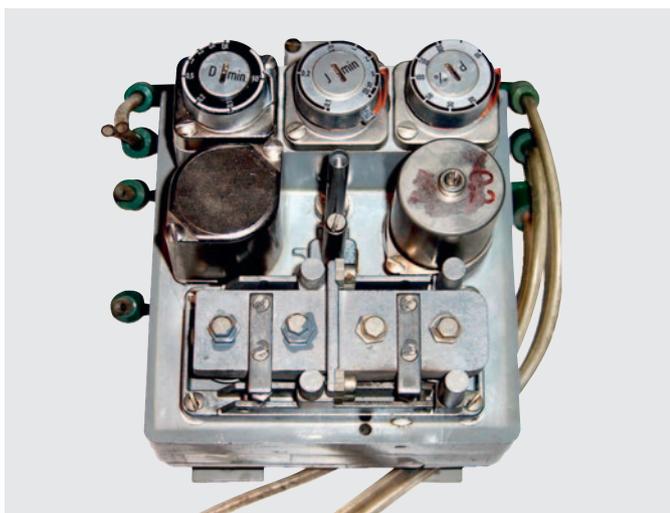


Рис. 1. Пневматический PID-контроллер

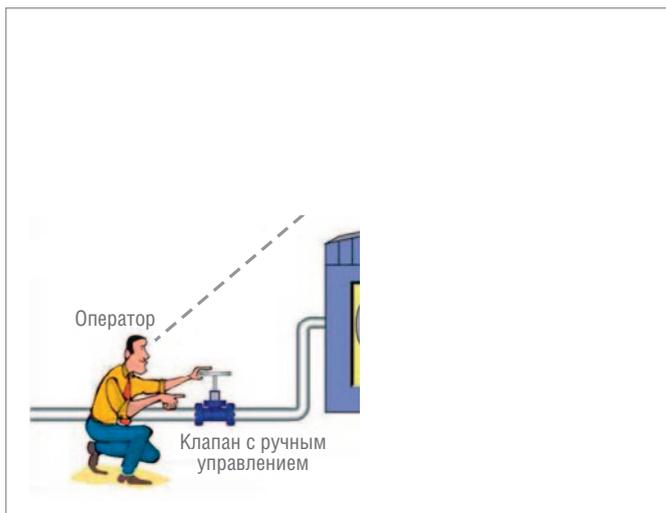


Рис. 2. Оператор управляет процессом вручную

процесса и выходной сигнал контроллера передаются в цифровой форме или посредством сигналов тока, напряжения (рис. 3).

Когда всё включено и работает, ПИД-регулятор получает сигнал переменной процесса, сравнивает его с уставкой и вычисляет разницу между двумя сигналами, также называемую ошибкой ( $E$  – Error). Затем на основании величины ошибки и констант настройки ПИД-регулятора контроллер рассчитывает соответствующий выходной сигнал, который устанавливает регулирующий клапан в правильное положение для поддержания температуры на заданном уровне. Если температура поднимется выше заданного значения, контроллер уменьшит степень открытия клапана, и наоборот.

### ПИД-контроль

ПИД-регуляторы имеют три режима управления: пропорциональный, интегральный и дифференциальный. Каждый из трёх режимов по-своему реагирует на возникновение ошибки. Размер и характер отклика, создаваемого каждым режимом управления, регулируется путём изменения соответствующих настроек контроллера.



Рис. 3. PID-контроллер управляет процессом автоматически

### РЕЖИМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

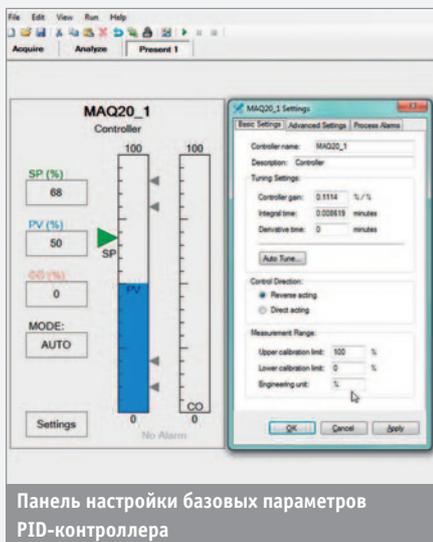
Главной движущей силой в контроллере является режим пропорционального управления. Он изменяет сигнал на

## MAQ<sup>®</sup>20

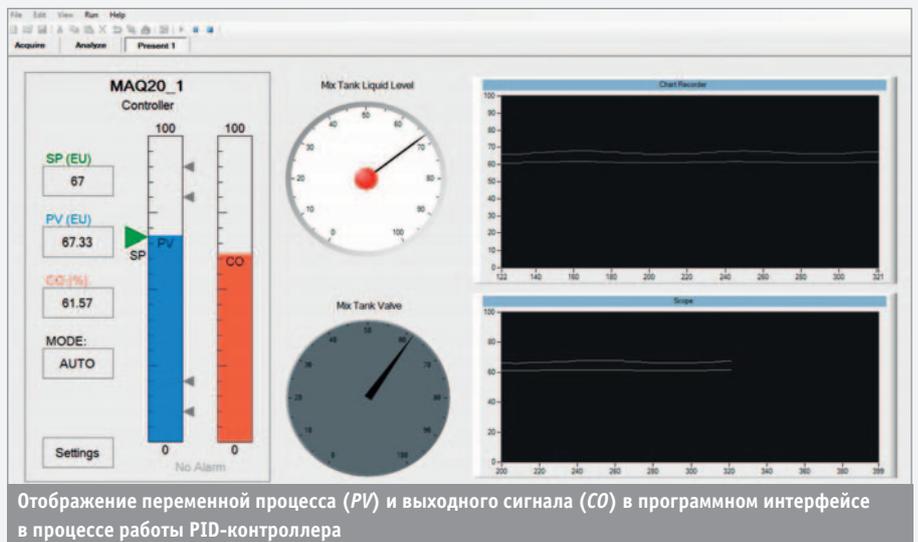
PID-регулятор Dataforth – это программный пропорционально-интегрально-дифференциальный (PID) контроллер для управления промышленными процессами и оборудованием с обратной связью в реальном времени. Это один из нескольких инструментов сбора и управления данными, встроенных в модули MAQ<sup>®</sup>20 и программное обеспечение MAQ20-940 ReDAQ<sup>®</sup>Share для MAQ<sup>®</sup>20. Для работы промышленная система сбора и обработки данных MAQ<sup>®</sup>20 MA1056 на основе коммуникационных модулей MAQ20-COM4 и MAQ20-COM2 с Ethernet, USB и с интерфейсом RS-232 или RS-485 должна состоять как минимум из одного коммуникационного модуля, магистрали и одного модуля ввода/вывода. ПИД-контроллер встроен в коммуникационные модули MAQ<sup>®</sup>20 и может после настройки с помощью программного обеспечения ReDAQ<sup>®</sup>Share или команд

Modbus работать автономно. После сброса питания контроллер автоматически возобновит управление. Для работы на одном коммуникационном модуле MAQ<sup>®</sup>20 можно настроить до 32 PID-контроллеров. Каждый из них сможет получать данные процесса от любого аналогового модуля ввода или дискретного ввода MAQ<sup>®</sup>20, установленного в системе, и обеспечит выходные сигналы управления процессом через любой аналоговый выход модуля MAQ<sup>®</sup>20 или модуль дискретного вывода в системе. Контроллеры работают с фиксированной частотой обновления один раз в секунду. Программное обеспечение MAQ20-940 ReDAQ<sup>®</sup>Share для MAQ<sup>®</sup>20 имеет специальную панель управления, через которую инженер или оператор может взаимодействовать с контроллерами. Программа также предоставляет временные тренды для мониторинга контроллера и процесса во вре-

мени. Одной из отличительных особенностей ПИД-регулятора Dataforth является функция автонастройки, которая используется для упрощения сложной задачи настройки контура управления. Для пользователей с ограниченным или отсутствующим опытом в петлевой настройке ПИД-регуляторов компания Dataforth подготовила несколько подробных замечаний по этой теме и настоятельно рекомендует ими воспользоваться. Автонастройка может быть очень полезна, однако нельзя ожидать, что она найдёт решение для любой задачи и любого контура управления. Для достижения стабильной петли обратной связи может потребоваться базовое понимание процессов. Большинство циклов не нуждаются или не используют составляющую D в PID-регуляторах: пропорционально-интегрального (PI) управления более чем достаточно. ■



Панель настройки базовых параметров PID-контроллера



Отображение переменной процесса (PV) и выходного сигнала (CO) в программном интерфейсе в процессе работы PID-контроллера

выходе контроллера пропорционально ошибке (рис. 4). Если ошибка увеличивается, управляющее действие увеличивается пропорционально ей. Это очень полезно, так как для исправления больших ошибок требуется более интенсивное действие. Регулируемая настройка для пропорционального управления называется усилением контроллера ( $K_c$  – Controller Gain). Более высокое усиление увеличит пропорциональное управляющее воздействие для данной ошибки. Если усиление регулятора установлено слишком высоким, контур управления начнёт колебаться и станет нестабильным. Если усиление регулятора установлено слишком низким, контроллер не будет адекватно реагировать на изменения параметра регулирования или уставки.

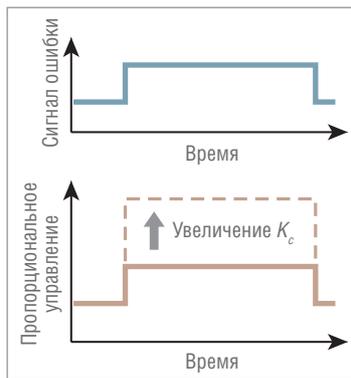


Рис. 4. Действие пропорциональной составляющей управления

В большинстве контроллеров изменение усиления влияет на величину отклика в интегральном и дифференциальном режимах управления. Вот почему этот параметр называется усилением контроллера. Однако существует одна конструкция контроллера (называемая алгоритмом параллельного, или независимого усиления), в которой регулировка пропорционального усиления не влияет на другие режимы.

### ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР

Отключив интегральный и дифференциальный режимы, ПИД-регулятор можно настроить так, чтобы он производил только пропорциональное действие. Пропорциональные контроллеры просты для понимания и настройки. Выходной сигнал контроллера – это просто ошибка управления, умноженная на усиление контроллера, плюс смещение (рис. 5). Смещение необходимо, чтобы контроллер мог поддерживать ненулевой выходной сигнал при нулевой ошибке (переменная процесса в заданном значении). Использование пропорционального управления имеет большой недостаток – отклонение. Отклонение – это постоянная ошибка, которая не может быть устранена одним только пропорциональным управлением. Давайте рассмотрим контроль уровня воды в баке на рис. 6 с помощью пропорционального контроллера. Пока расход воды из бака остаётся постоянным, уровень будет находиться на заданном значении. Но если оператор увеличит расход из резервуара, уровень воды начнёт уменьшаться из-за дисбаланса между притоком и оттоком. При снижении уровня воды в баке ошибка растёт и пропорциональный контроллер увеличивает выходной сигнал пропорционально этой ошибке. Следовательно, клапан, управляющий потоком в бак, открывается шире и в бак поступает больше воды. Если уровень всё равно продолжает падать, ошибка увеличивается ещё больше и клапан продолжает открываться, пока не будет достигнута точка, в которой приток снова будет соответствовать оттоку. В этот момент уровень воды в баке (и ошибка) станет постоянным. Поскольку ошибка остаётся постоянной, наш P-контроллер будет поддерживать постоянный выходной сигнал и регулирующий клапан будет удерживать своё положение. Система теперь снова сбалансирована, но уровень воды в баке стал ниже заданного значения. Эта оставшаяся постоянная ошибка назы-

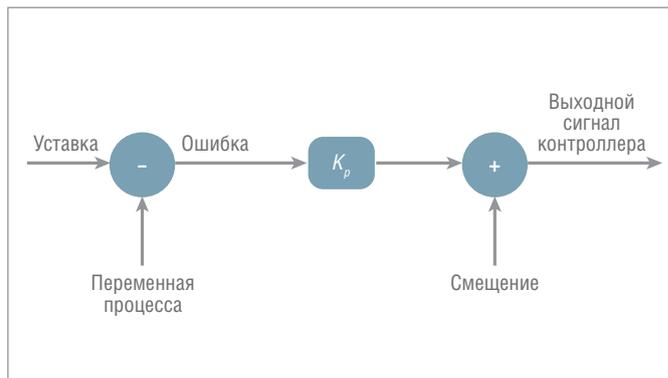


Рис. 5. Пропорциональное управление



Рис. 6. Пропорциональный контроль уровня в процессе ручного отбора воды из бака

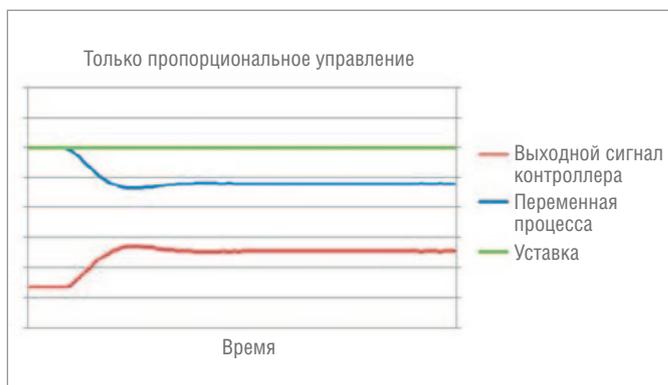
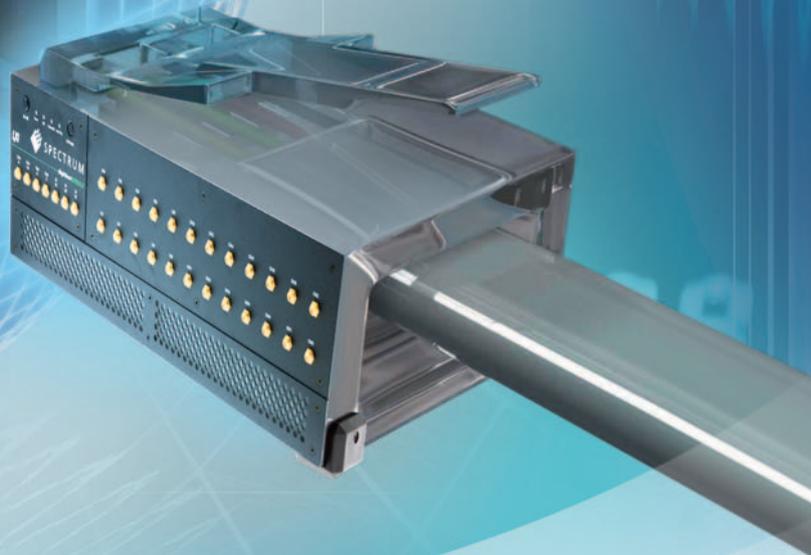


Рис. 7. Реакция пропорционального контроллера на возмущение

вается отклонением. На рис. 7 показано влияние внезапного снижения давления топливного газа на работу описанного ранее промышленного нагревателя и реакция пропорционального контроллера на данную ситуацию. Снижение давления топливного газа понижает интенсивность горения и соответственно мощность нагревателя. Температура воды снижается. Это создаёт ошибку, на которую отвечает контроллер. Однако обнаруживается новая точка баланса между управляющим воздействием и ошибкой и изменение температуры пропорциональным регулятором не устраняется. При пропорциональном управлении отклонение будет сохраняться до тех пор, пока оператор с целью его устранения вручную не скорректирует выходной сигнал контроллера. Тогда говорят, что оператор вручную сбрасывает контроллер.



# Измерения везде, где есть Интернет

Высокоскоростные многоканальные АЦП  
и генераторы сигналов стандарта LXI



## digitizerNETBOX

- более 70 моделей
- от 2 до 48 синхронных каналов
- 5 Гсэмпл/с, 8 бит
- 500 Мсэмпл/с, 14 бит
- 200 ксэмпл/с – 250 Мсэмпл/с, 16 бит



## generatorNETBOX

- от 2 до 24 каналов
- 60–125 Мсэмпл/с, 14 бит
- 625 Мсэмпл/с – 1,25 Гсэмпл/с, 16 бит



## ИНТЕГРАЛЬНЫЙ РЕЖИМ УПРАВЛЕНИЯ

Необходимость избавиться от ручного сброса по описанному ранее сценарию привела к разработке автоматического сброса, или режима встроенного управления, как это называется сегодня. Функция режима встроенного управления заключается в увеличении или уменьшении выходного сигнала контроллера с течением времени, чтобы

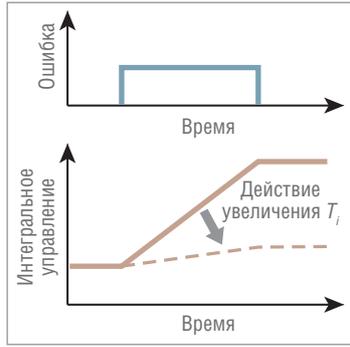


Рис. 8. Действие интегральной составляющей управления

уменьшить имеющуюся ошибку (когда переменная процесса не находится в заданном интервале значений). При наличии достаточного времени интегральный механизм будет изменять выходной сигнал контроллера, пока ошибка не станет равной нулю. Если ошибка велика, интегральный режим будет увеличивать/уменьшать выходной сигнал контроллера с более высокой скоростью; если ошибка мала, изменения будут медленными. Для данной ошибки скорость интегрального действия задаётся интегральной настройкой времени контроллера ( $T_i$  – Integral Time). Большое значение  $T_i$  (длинное время интегрирования) приводит к медленному интегральному действию, а небольшое значение  $T_i$  (короткое время интегрирования) приводит к быстрому интегральному действию (рис. 8). Если интервал времени интегрирования установлен слишком большим, конт-

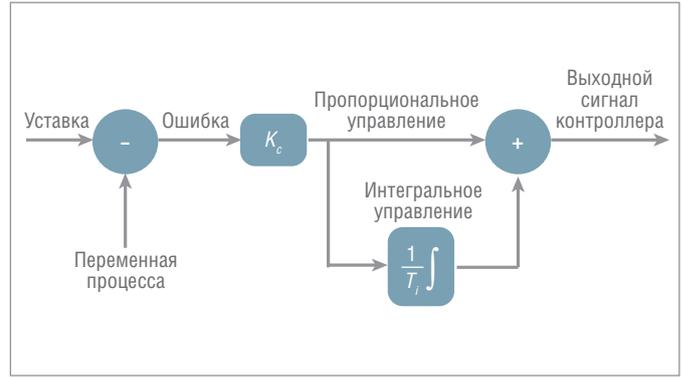


Рис. 9. Алгоритм PI-регулирования

роллер будет реагировать медленно; если он установлен слишком коротким, контур управления будет колебаться и станет нестабильным. Большинство контроллеров, включая MAQ<sup>®</sup>20, в качестве единицы измерения для интегрального управления используют интегральное время ( $T_i$ ) в минутах, но некоторые определяют его в секундах. Немногие контроллеры, обычно с параллельным алгоритмом, используют параметр «интегральное усиление» ( $K_i$ ) в повторениях в минуту. Параллельный алгоритм работы также доступен в MAQ<sup>®</sup>20.

## ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР

Обычно пропорционально-интегральный контроллер называют PI-контроллером, его выход состоит из суммы пропорциональных и интегральных управляющих воздействий

# XTR – СЕРИЯ КОНТРОЛЛЕРОВ И МОДУЛЕЙ ДЛЯ ЖЕСТКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ



- Диапазон рабочих температур: –40...+70°C
- Вибрационные нагрузки до 5g
- Защита от импульсных скачков напряжения до 5 кВ
- Позолоченное покрытие силовых контактов
- Искробезопасные модули
- Повышенная влагостойкость



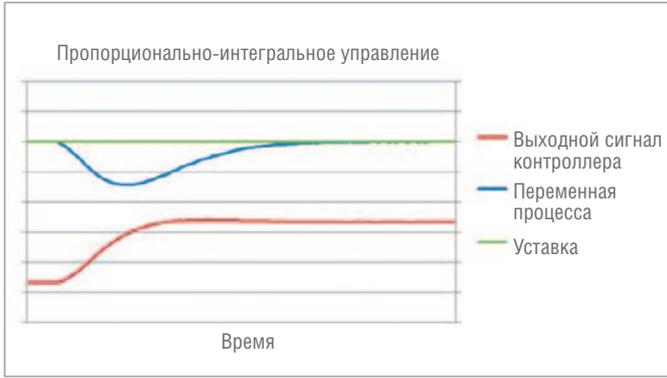


Рис. 10. Отклик PI-контроллера на возмущение

(рис. 9). На рис. 10 показано, как после возмущения интегральный режим продолжает увеличивать выходной сигнал контроллера, чтобы вернуть температуру на выходе нагревателя к заданному значению. Если сравнить это с рис. 7, становится ясно, как интегральное управление продолжает управлять выходом контроллера до тех пор, пока смещение не будет устранено полностью.

**РЕЖИМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Третий режим управления в ПИД-контроллере – это режим управления по производной. Дифференциальный контроль редко используется в управлении процессами, но он часто применяется в управлении движением. Для управления процессом это не является абсолютно необходимым: дифференциальный режим очень чувствителен к инструментальному шуму и

усложняет настройку методом проб и ошибок. Тем не менее, его использование может привести к тому, что определённые типы контуров управления будут реагировать немного быстрее, чем при применении только ПИ-регулирования. Температурное управление, например, является типичной задачей для ПИД-регулирования. Режим управления по производной обеспечивает сигнал, основанный на скорости изменения ошибки (рис. 11). Из-за этого дифференциальный режим изначально назывался управлением по скорости. Дифференциальный режим производит большее управляющее действие, если ошибка изменяется с большей скоростью. Если величина ошибки не меняется во времени, действие дифференциальной составляющей равно нулю. Дифференциальный режим имеет настройку, называемую Derivative Time ( $T_d$ ). Чем больше значение этого времени, тем больше вклад дифференциального управления. Установка времени  $T_d$  на ноль полностью отключает этот режим. Если время установлено слишком большим, будет возникать колебания и контур управления станет нестабилен. Для настройки дифференциальной составляющей контроллера используются две единицы измерения: минуты и секунды.

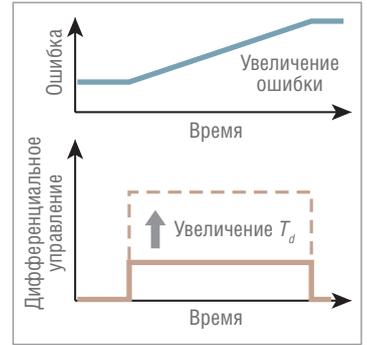


Рис. 11. Процесс дифференциального регулирования

МОСКВА  
(495) 234-0636  
info@prosoft.ru

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
(812) 448-0444  
info@spb.prosoft.ru

ЕКАТЕРИНБУРГ  
(343) 356-5111  
info@prosoftsystems.ru

(912) 620-8050  
ekaterinburg@regionprof.ru



Роском

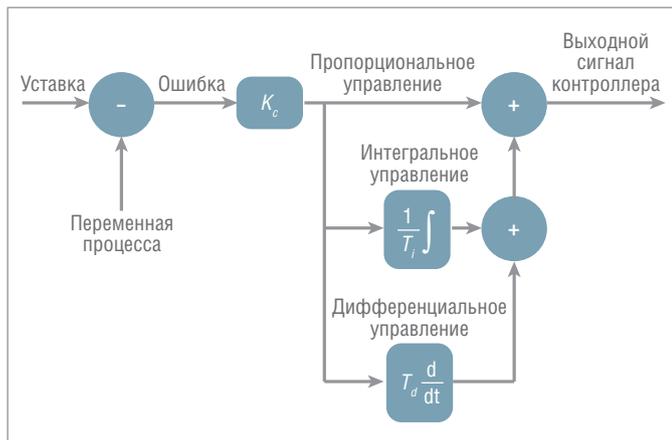


Рис. 12. Неинтерактивный алгоритм PID-управления

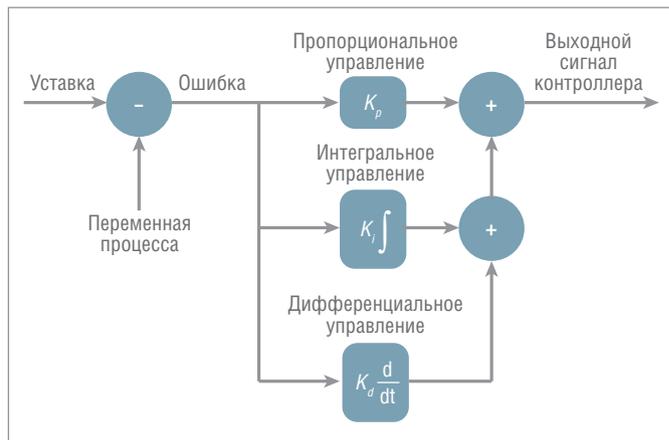


Рис. 13. Параллельный алгоритм PID-управления

### ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЛЕР

Такой контроллер, обычно называемый ПИД-регулятором, работает на основе суммы пропорциональных, интегральных и дифференциальных управляющих воздействий.

На рис. 12 показан алгоритм неинтерактивного (также называемого идеальным) ПИД-регулятора, а на рис. 13 представлен алгоритм параллельного контроллера. Оба они поддерживаются в системе MAQ®20. Дифференциальный режим ПИД-регулятора обеспечивает большее управляющее воздействие раньше, чем это возможно при управлении только Р или PI.

Это уменьшает влияние возмущения и сокращает время, необходимое для того, чтобы уровень вернулся к своему заданному значению (рис. 14).

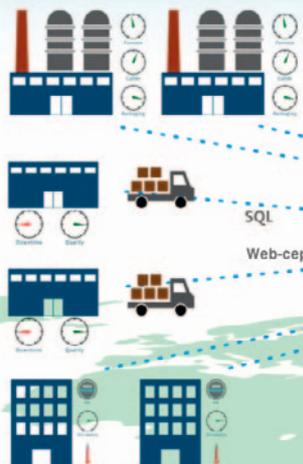
На рис. 15 сравнивается скорость восстановления при Р, PI и PID-регулировании температуры на выходе нагревателя после внезапного изменения давления топливного газа, как описано ранее.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПИД-регулятор является рабочей лошадкой современных систем управления процессами. Каждый из режимов пропорционального, интегрального и дифференциального управления выполняет свою уникальную функцию. Пропорциональ-



# Мощный сервер архивации Hyper Historian™

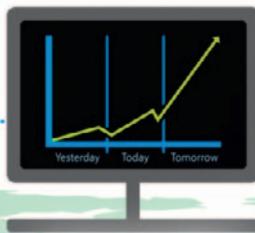


OPC UA  
OPC  
SQL  
Web-сервисы  
BACnet  
SNMP



$n^k$   
 $n!$   
 $Q_1$   
 $P_{x,y}$

0681493  
СОБРАНО ТЕГОВ



Сбор

Сжатие

Архив

Анализ и визуализация



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU







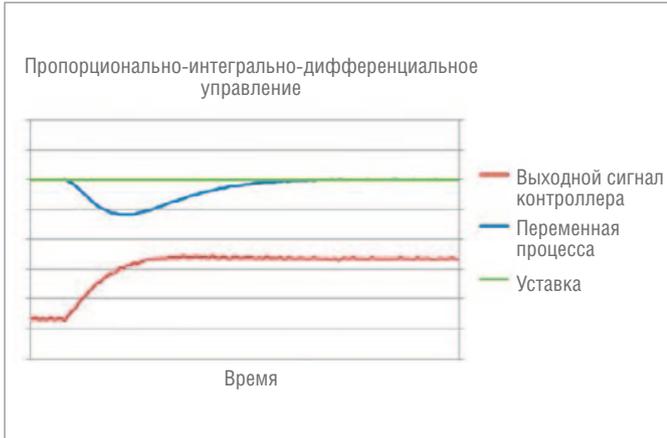


Рис. 14. Реакция PID-контроллера на возмущение

ные и интегральные режимы необходимы для большинства контуров управления, а регулирование по производной полезно только в некоторых случаях. Существуют различные алгоритмы ПИД-регулирования, и MAQ<sup>®</sup>20 поддерживает наиболее распространенный неинтерактивный алгоритм, а также параллельный алгоритм.

Универсальность делает MAQ<sup>®</sup>20 чрезвычайно мощным устройством и адаптируемым для широкого спектра приложений управления процессами, включая:

- тестирование и измерения;
- автоматизацию производства и процессов;
- автоматизацию машин;
- военную и аэрокосмическую промышленность;

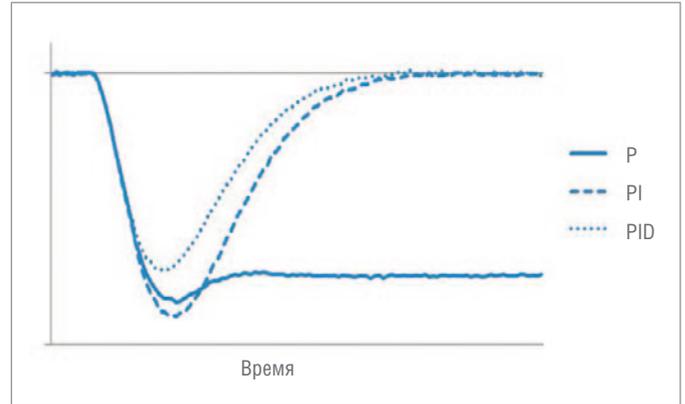


Рис. 15. Сравнение скоростей реакций P, PI и PID-контроллеров на возмущение

- энергетику;
- мониторинг окружающей среды;
- нефтегазовую сферу.

Линейка продуктов MAQ<sup>®</sup>20, вобравшая в себя более 25 лет опыта проектирования компании Dataforth в индустрии управления процессами, предлагает самую низкую стоимость на канал, точность  $\pm 0,035\%$  и изоляцию 1500 В, а также обеспечивает превосходное ПИД-управление процессами. ●

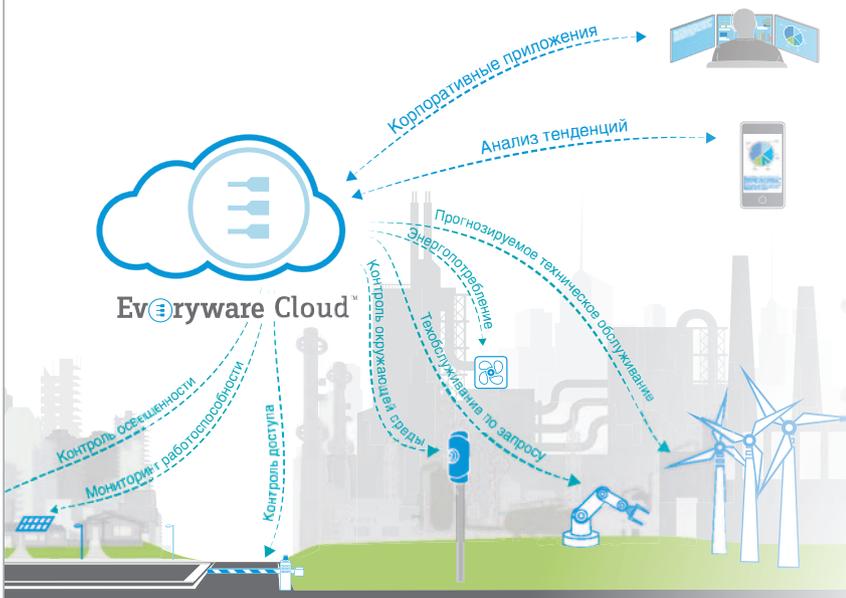
**Авторизованный перевод**  
**Юрия Широкова**  
**E-mail: [textoed@gmail.com](mailto:textoed@gmail.com)**



**EUROTECH**  
Imagine. Build. Succeed.

## Облачные технологии

### Eurotech для автоматизации



Корпоративные приложения

Анализ тенденций

Прогнозируемое техническое обслуживание

Энергоуправление

Телеобслуживание по запросу

Контроль окружающей среды

Контроль доступа

Мониторинг работоспособности

Контроль эффективности

**Выполняемые функции**

- Управление устройством
- Приложение для устройства и управления жизненным циклом
- Контроль состояния устройства/связи в режиме реального времени
- Поддержка промышленных протоколов
- Простая интеграция с корпоративными приложениями
- Сбор потоков данных с различных устройств в реальном времени
- Анализ данных в реальном времени, их хранение и предоставление исторических данных



**PROSOFT<sup>®</sup>**

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

[WWW.PROSOFT.RU](http://WWW.PROSOFT.RU)

