

Аналого-цифровая система с ПИД-регулированием на базе микроконтроллера

Имон Нири

ВВЕДЕНИЕ

В системе управления процессом (рис. 1) некая величина (регулируемый параметр), например температура, сравнивается с установленным значением. Полученная разница, или *сигнал погрешности $e(t)$* , поступает на вход схемы управления. Используя сигнал погрешности в качестве входного параметра, схема управления выдаёт *управляющий сигнал $u(t)$* , который воздействует на процесс таким образом, что регулируемый параметр изменяется в сторону уменьшения величины ошибки.

Довольно часто для управления процессом используется алгоритм PID (*proportional-integral-derivative*). При этом суммируется три параметра сигнала погрешности: усиленный сигнал собственно погрешности (*proportional*); составляющая, пропорциональная интегралу сигнала погрешности (*integral*); и составляющая, пропорциональная скорости изменения сигнала погрешности, то есть производной этого сигнала (*derivative*). При замкнутой петле регулирования пропорциональная составляющая меняется в сторону уменьшения величины погрешности со скоростью, соответствующей мгновенной величине ошибки; интегральная составляющая – накопленная погрешность – способствует медленному снижению величины погрешности (эта составляющая обеспечивает тенденцию ошибки стремиться к нулю); и дифференциальная составляющая учитывает скорость изменения величины погрешности для уменьшения будущего значения ошибки, что повышает скорость реакции петли регулирования и повышает стабильность петли за счёт компенсации задержки, присущей интегральной компоненте системы регулирования.

Сочетание этих трёх составляющих способно обеспечить очень точное и устойчивое регулирование. Но параметры должны быть индивидуально рассчитаны или настроены на оптимальное поведение конкретной системы регулирования. Так как процессы с многочисленными задержками или запаздываниями трудно поддаются управлению, простой PID регулятор даёт наилучшие результаты применительно к процессам, быстро реагирующим на изменение регулируемого параметра (который часто представляет собой скорость потока или мощность). PID регулирование применяется в системах, где режим постоянно меняется и где от

регулятора требуется автоматическое отслеживание частых изменений устанавливаемого параметра или отклонений регулируемой величины.

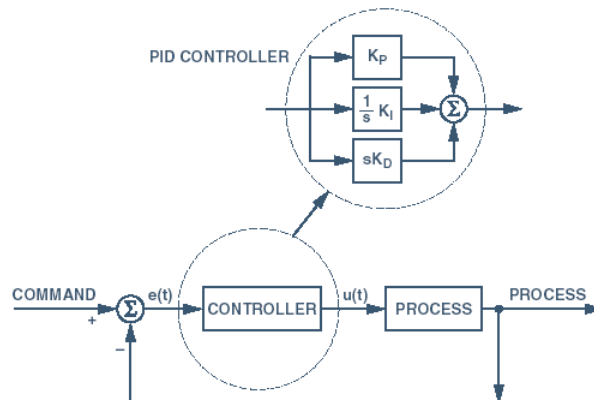


Рис. 1. Функциональная схема PID-регулятора

Параметры PID-регулятора для медленных процессов сначала обычно вычисляют с помощью моделирования. Существует много эффективных алгоритмов регулирования, но большое преимущество промышленных систем управления с PID-регулятором – то, что они стандартны, проверены временем и их теория хорошо разработана. Кроме того, из-за непредсказуемости процесса более сложные схемы управления не обязательно будут более эффективны, чем хорошо настроенный PID-регулятор.

Параметры PID-регулятора были перечислены выше. Приводим более подробное их описание.

Пропорциональное управление

В петле пропорционального управления используется сигнал пропорциональный величине погрешности. Если коэффициент усиления увеличивается, уменьшается время реакции системы на изменения и уменьшается остаточная (стационарная) величина погрешности, но система становится менее стабильной, так как при этом она недостаточно демпфирована. Дальнейшее увеличение коэффициента усиления приведет к появлению выбросов при ступенчатом воздействии, появлению колебаний и даже к незатухающим колебаниям.

Интегральное управление

Пропорциональное управление может значительно уменьшить величину погрешности, но не может свести её к нулю. Однако погрешность можно свести к нулю, если добавить интегральную составляющую в систему управления. Интегратор при замкнутой петле ОС будет способствовать сведению усредненной погрешности к нулю (в противном случае выходной сигнал интегратора накапливал бы ошибку, пока не пришел бы в насыщение). При повышении коэффициента усиления интегральной составляющей K_I погрешность быстрее устремляется к нулю (и далее, т.е. происходит выброс) в ответ на

а

изменение входного параметра; слишком большой K_I приведет к колебаниям и неустойчивости.

Дифференциальное управление

Если в петлю управления ввести сигнал производной, или скорость изменения сигнала погрешности – мы можем увеличить стабильность, уменьшить выброс при переходном процессе, который возникает когда коэффициенты усиления пропорциональной и/или интегральной составляющей велики, и увеличить скорость реакции системы за счет противодействия изменениям погрешности. Коэффициент усиления дифференциальной составляющей, или "коэффициент демпфирования" K_D можно без труда подобрать с целью добиться устойчивого затухания (демпфированной характеристики) в ответ на изменения управляющего сигнала или регулируемой величины. Слишком малое демпфирование приведет к тому, что будет присутствовать выброс при переходном воздействии, вызываемый пропорциональной и интегральной составляющими; слишком большое демпфирование может привести к неприемлемо длительному отклику системы. Кроме того, разработчик должен учитывать, что усилитель дифференциального сигнала будет вносить высокочастотный шум в управляющий сигнал.

Таким образом, пропорциональное управление (P) способствует уменьшению времени реакции и уменьшению (но не полному устранению) остаточной погрешности. Пропорционально-интегральное управление (PI) обеспечивает устранение остаточной погрешности, но ухудшает характеристики переходного процесса. Пропорционально-интегрально-дифференциальный (PID) контроллер обладает более высокой стабильностью, меньшей величиной выброса и лучшей переходной характеристикой. Эффекты, вызываемые вариацией параметров в замкнутой системе регулирования, перечислены в таблице I.

Параметр	Скорость нарастания	Выброс	Время установления	Остаточная погрешность
K_P	Уменьшается	Увеличивается	Мало изменяется	Уменьшается
K_I	Уменьшается	Увеличивается	Увеличивается	Полностью устраняется
K_D	Мало изменяется	Уменьшается	Уменьшается	Мало изменяется

Сумма трех составляющих сигнала управления:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Данной формуле соответствует передаточная функция

$$K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}$$

В схеме, приведенной на рис. 1, разница между установленной и фактической величиной параметра представлена в виде сигнала ошибки $e(t)$. Сигнал ошибки поступает на вход PID регулятора, который вычисляет производную и интеграл сигнала погрешности, умножает их на три соответствующих коэффициента и находит сумму полученных параметров, получая таким образом сигнал $u(t)$.

Цифровое PID регулирование

Алгоритм PID, широко применяемый сегодня в управлении промышленными процессами, был разработан и исследован почти век назад, сначала для пневматического управления. Электроника – впервые примененная для моделирования PID при разработке управляющих систем на аналоговом компьютере в 40-50 гг. – стала всё шире применяться как средство реализации систем управления, сначала в аналоговых системах управления, а позднее – и в цифровых контроллерах. Программная реализация PID-алгоритма на 8-разрядных микроконтроллерах на сегодня хорошо разработана.

В данной статье мы покажем основные составляющие цифрового PID-регулятора – и затем продемонстрируем, каким образом можно без особых затрат воплотить такой регулятор с помощью микроконвертора фирмы Analog Devices, аналого-цифрового прибора для обработки сигналов.

Можно рассмотреть работу петли PID на примере кондиционера или холодильной установки, предназначенной для постоянного контроля и поддержания точного значения температуры (и сравнить систему PID с обычным термостатом, имеющим компаратор и ключ). На рис. 2 показана общая схема системы управления, которая контролирует температуру за счет непрерывного управления скоростью вентилятора, увеличивая или уменьшая поток воздуха.

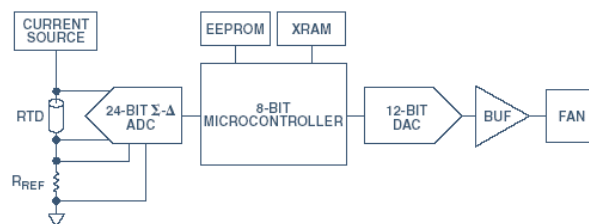


Рис. 2. Пример PID-регулятора, управляющего вентиляцией с целью поддержания определенной температуры.

а

От системы требуется, чтобы она поддерживала температуру в камере как можно ближе по величине к заданному пользователем значению. Для этого система должна точно измерять температуру в камере и соответствующим образом регулировать скорость вращения вентилятора.

В системе, показанной на рис. 2, ток от прецизионного источника течет через термистор или резистивный датчик температуры (RTD), соединенный последовательно с прецизионным резистором, задающим величину температуры. Аналого-цифровой преобразователь (ADC) измеряет величину разности между опорным напряжением на R_{REF} и напряжением на термисторе в качестве сигнала погрешности установки температуры. 8-разрядный микроконтроллер обрабатывает результат, полученный аналого-цифровым преобразователем и реализует алгоритм PID управления. Микроконтроллер управляет скоростью вращения вентилятора с помощью цифро-аналогового преобразователя (DAC). ПЗУ программ и ОЗУ необходимы для работы 8-битного микроконтроллера.

Если используется пропорциональное (P) управление, скорость вращения вентилятора прямо зависит от того, насколько измеренное значение температуры отличается от установленного. Как говорилось выше, при таком подходе будет присутствовать остаточная ошибка.

Добавление интегральной составляющей (PI) приводит к тому, что скорость вращения вентилятора постепенно повышается или понижается в зависимости от величины ошибки. За счет этого компенсируется погрешность температуры, вызванная тем, что днём температура повышается, а вечером понижается. Таким образом интегральная составляющая устраняет погрешность, но если коэффициент при интегральной составляющей велик, могут возникнуть колебания параметра около установленного значения. (Обратите внимание, что колебания присущи простым термостатам на основе компаратора и ключа).

Склонность к возникновению колебаний может быть в значительной мере устранена введением дифференциальной составляющей (PID). Дифференциальная составляющая соответствует скорости изменения величины погрешности. Эта компонента способствует быстрой компенсации резких изменений температуры, вызванных, например, открыванием окна или двери.

Для упрощения системы, минимизации стоимости компонентов и сборки, минимизации площади платы рекомендуется применить контроллер с высокой степенью интеграции, см. рис. 3.

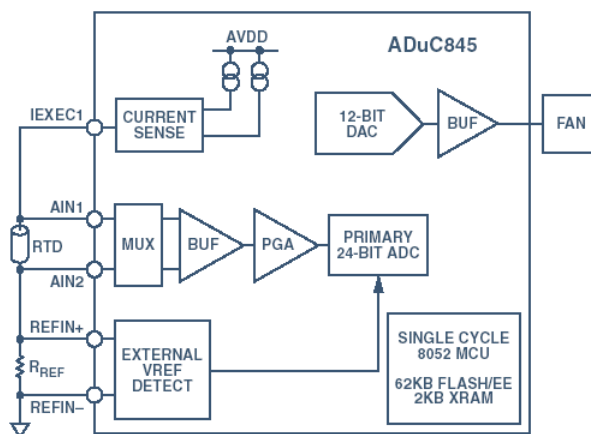


Рис. 3. «Система на кристалле»

В составе микроконвертера ADuC845 имеется 62КВ флэш-памяти программ, 4КВ флэш-памяти данных и 2КВ ОЗУ. Флэш-память данных может быть использована для сохранения коэффициентов "настройки" петли PID, в то время как быстрое "одноцикловое" ядро обеспечивает достаточный вычислительный ресурс для того, чтобы одновременно осуществлять алгоритм PID и выполнять другие задачи.

В зависимости от того, который из МикроКонверторов выбран, разрешение АЦП соответствует 12-24 разрядам. Для системы, где должна соблюдаться точность измерения температуры 0.1°C , идеально подходит ADuC845, обладающий 24-разрядным АЦП.

Ещё одна область применения систем регулирования с PID – это управление серводвигателями. В таких системах от двигателя требуется поворот на определенный угол, определяемый входным сигналом (например, поворотом потенциометра).

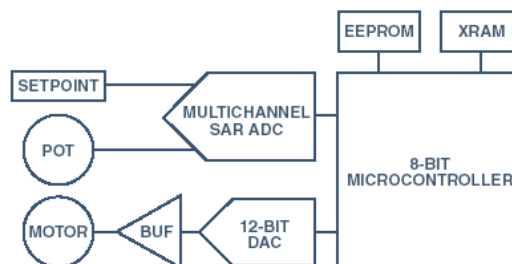


Рис. 4. Пример реализации системы управления двигателем

Здесь также система может быть реализована с помощью дискретных компонентов, или более простым путём – с помощью микросхем высокой степени интеграции. На рис. 5 показана система на базе МикроКонвертора. Устройство обеспечивает движение указателя в соответствии с поворотом установочного потенциометра.

а

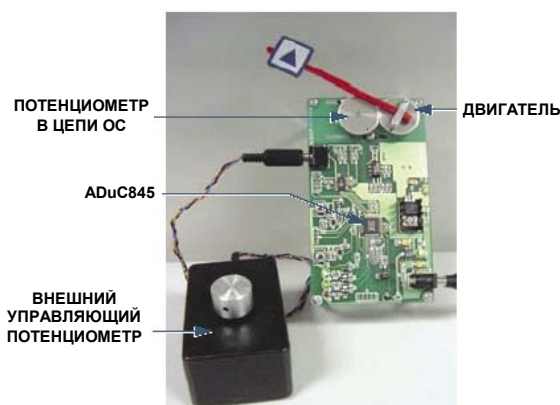


Рис. 5. Внешний вид системы управления двигателем

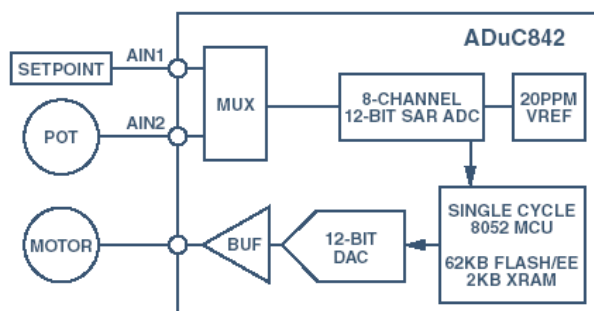


Рис. 6. Пример реализации системы управления двигателем на МикроКонверторе ADuC842

За счёт применения функциональных блоков, компактно интегрированных в МикроКонверторе ADuC842, снижается стоимость компонентов и сборки; управляющая электроника занимает значительно меньше места и обеспечивает более высокую надёжность. На рис. 6 показано, насколько упрощается аппаратная часть системы при использовании "системы на кристалле" ADuC842.

Помимо ИС ADuC842 на плате находятся: буферный усилитель для потенциометра, мощный выходной усилитель, управляющий двигателем, 5-вольтовый маломощный стабилизатор для питания прецизионной части схемы, мощный 5-вольтовый стабилизатор (с радиатором) для питания двигателя. Также на плате имеется индикаторный светодиод, кнопка сброса (RESET), кнопка для управления загрузкой данных в МикроКонвертер и некоторые пассивные элементы.

При помощи компьютера с программным обеспечением, моделирующим реакцию системы, получены переходные характеристики, показанные на рис. 7, они соответствуют разным величинам коэффициента при интегральной составляющей K_I и демонстрируют значение данной составляющей.

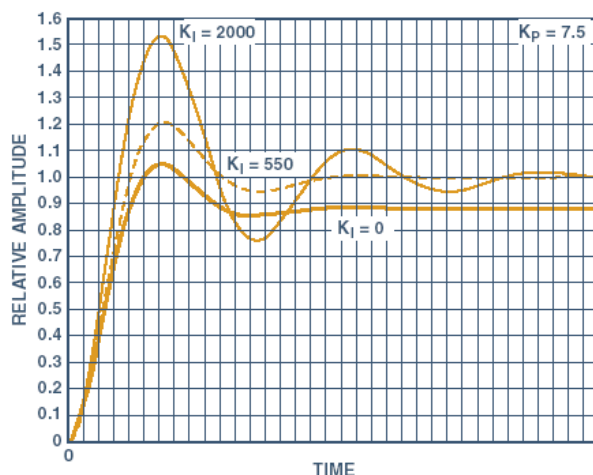


Рис. 7. Отклик петли пропорционально-интегрального (P-I) управления при трех различных значениях параметра K_I . Обратите внимание, что при $K_I = 0$ присутствует остаточная ошибка, при $K_I = 2000$ имеются плохо демпфированные колебания, которые почти отсутствуют при $K_I = 550$.

На рис. 8 показано улучшение реакции на ступенчатое воздействие в системе регулирования PID. Реакция более быстрая, петля обеспечивает высокую точность, демпфирование, отсутствует смещение, колебания и выброс регулируемой величины.

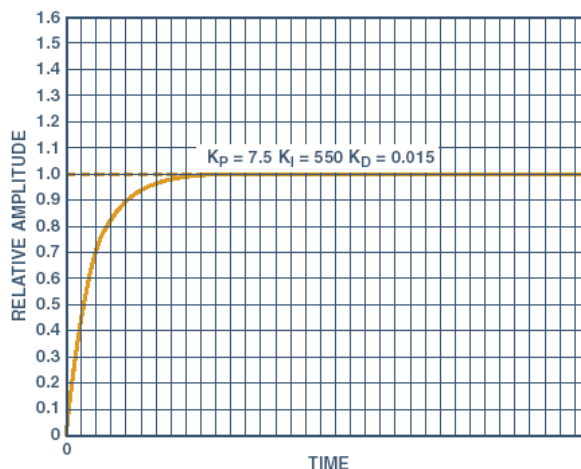


Рис. 8. Отклик петли PID на ступенчатое воздействие