УДК 681.5

Студ. А.В. Лакуцевич, М.С. Жукович
Науч. рук. доц. И.О. Оробей, доц. Д.А. Гринюк
(кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники, БГТУ)

РЕАЛИЗАЦИЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРА НА С++

ПИД регулятор был изобретён ещё в 1910 году. Через 32 года, в 1942 году, Зиглер и Никольс разработали методику его настройки. Пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор — устройство в управляющем контуре с обратной связью. Используется в системах автоматического управления для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса. ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе — интеграл сигнала рассогласования, третье — производная сигнала рассогласования. Если какие-то из составляющих не используются, то регулятор называют пропорционально-интегрирующим, пропорционально-дифференцирующим, и т.д.

Пропорциональная составляющая вырабатывает выходной сигнал, противодействующий отклонению регулируемой величины от заданного значения, наблюдаемому в данный момент времени. Он тем больше, чем больше это отклонение. Если входной сигнал равен заданному значению, то выходной равен нулю.

Однако при использовании только пропорционального регулятора значение регулируемой величины никогда не стабилизируется на заданном значении. Существует так называемая статическая ошибка, которая равна такому отклонению регулируемой величины, которое обеспечивает выходной сигнал, стабилизирующий выходную величину именно на этом значении. Например, в регуляторе температуры выходной сигнал (мощность нагревателя) постепенно уменьшается при приближении температуры к заданной, и система стабилизируется при мощности, равной тепловым потерям. Температура не может достичь заданного значения, так как в этом случае мощность нагревателя станет равна нулю, и он начнёт остывать.

Чем больше коэффициент пропорциональности между входным и выходным сигналом (коэффициент усиления), тем меньше статическая ошибка, однако при слишком большом коэффициенте усиления при наличии задержек (запаздывания) в системе могут начаться автоколебания, а при дальнейшем увеличении коэффициента система может потерять устойчивость.

Интегрирующая составляющая пропорциональна интегралу по времени от отклонения регулируемой величины. Её используют для устранения статической ошибки. Она позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку.

Если система не испытывает внешних возмущений, то через некоторое время регулируемая величина стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей будет равен нулю, а выходной сигнал будет полностью обеспечиваться интегрирующей составляющей. Тем не менее, интегрирующая составляющая также может приводить к автоколебаниям при неправильном выборе её коэффициента.

Дифференцирующая составляющая пропорциональна темпу изменения отклонения регулируемой величины и предназначена для противодействия отклонениям от целевого значения, которые прогнозируются в будущем. Отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему.

Идеализированное уравнение ПИД-регулятора имеет вид

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{TI}\int e(t)dt + TD\frac{de(t)}{dt} \qquad (1)$$

где K – коэффициент передачи, TI – постоянная интегрирования; TD – постоянная дифференцирования.

Для малых тактов квантования TS это уравнение можно преобразовать в разностное с помощью дискретизации, состоящей в замене производной разностью первого порядка, а интеграла – суммой. Непрерывное интегрирование может быть заменено интегрированием по методу прямоугольников или трапеций. При использовании метода прямоугольников получаем

$$u(k) = Ke(k) + \frac{TS}{TI}\sum_{i=0}^{k} e(i-1) + \frac{TD}{TS}\left(e(k) - e(k-1)\right), \qquad (2)$$

где k – номер такта.

Таким образом, мы получили нерекуррентный алгоритм управления. В нем для формирования суммы необходимо помнить все предыдущие значения сигнала ошибки $e(t)$. Поскольку каждый раз значение управляющего сигнала $u(k)$ вычисляется заново, этот алгоритм называют «позиционным».

Однако для программирования на контроллерах более удобны рекуррентные алгоритмы. Эти алгоритмы отличаются тем, что для вычисления текущего значения управляющей переменной $u(k)$ используются ее предыдущее значение $u(k-1)$ и поправочный член. Для получения рекуррентного алгоритма достаточно вычесть из уравнения (2) следующее уравнение:

$$u(k-1) = Ke(k-1) + \frac{TS}{TI}\sum_{i=0}^{k-1} e(i-1) + \frac{TD}{TS}\left(e(k-1) - e(k-2)\right). \qquad (3)$$

В результате получим

$$u(k) - u(k-1) = q0\ e(k) + q1\ e(\mathrm{k}-1) + \mathrm{q2}\ \mathrm{e}(k-2),$$

где q0 = $K + TD/TS$; q1 = $-K + 2TD/TS - TS/TI$; q2 = TD/TS;.

Теперь вычисляется только текущее приращение управляющей переменной

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1). \qquad (4)$$

и поэтому этот алгоритм называют «скоростным».

Следует отметить, что после небольшой модификации способа интегрирования в уравнении (2) под знаком суммы можно использовать значения $e(k-1)$ вместо $e(k)$.

Если для аппроксимации интеграла использовать метод трапеций, то на основании уравнения (1) будет получено следующее соотношение:

$$u(k) = Ke(k) + \frac{TS}{TI}\left(\frac{e(0)+e(k)}{2} + \sum_{i=0}^{k-1} e(i)\right) + \frac{TD}{TS}\left(e(k) - e(k-1)\right), \qquad (2)$$

Вычитая из него соответствующее уравнение для $u(\mathrm{k}-1)$, получим другое рекуррентное выражение, описывающее динамику дискретного закона управления:

$$u(k) = u(k-1) + q0\ e(k) + q1\ e(\mathrm{k}-1) + \mathrm{q2}\ \mathrm{e}(k-2),$$

где q0 = $K + TS/(2TI) + TD/TS$; q1 = $-K + 2TD/TS - TS/(2TI)$; q2 = TD/TS.

Другим немаловажным условием работы близкой к идеальной форме работы дискретного ПИД- регулятора является жесткое соблюдение времени квантования *TS*. При наличии алгоритмов проверки условий типа *if* и им подобный, каждое последующее формирование управляющего воздействия будет происходить не регулярно. Увеличение очень часто приводит к улучшению качества регулирования. Поэтому формирование управляющего воздействия с помощью таймера с высоким приоритетом является распространенной практикой реализации ПИД-закона.

Как хорошо известно, дискретные регуляторы обычно обладают худшими качественными характеристиками, чем непрерывные. Иногда это объясняют тем, что дискретные выборки сигналов содержат меньше информации, чем непрерывные сигналы. Однако интерес представляет не только количество информации, но и то, как она используется.

Поскольку кроме этого важную роль играют класс и частотный спектр возмущающих сигналов. Оказывается достаточно сложным сделать обобщающие выводы о качестве процессов регулирования в дискретных системах. В случае параметрически оптимизируемых регуляторов, как правило, принято считать, что качество управления ухудшается с ростом величины такта квантования. Следовательно, если поставлена задача обеспечения качества управления, такт квантования следует выбирать как можно меньшим.

Выбор такта квантования зависит не только от достижимого качества управления. Необходимо учитывать следующие факторы: требуемое качество управления; динамику объекта; спектры возмущений; исполнительное устройство и его привод; измерительные приборы; требования оператора; вычислительные затраты или стоимость одного контура управления; используемую модель объекта.

Программа использована на Arduino MEGA. Необходимо было реализовать ПИД регулятор, для управления двигателем, на языке C++. Программа написана для компиляции в среде разработке Arduino IDE.

Реализация ПИД закона регулирования на языке C++.

```
void motor: :Management(\void)
{
//ПИД регулятор
g = analogRead(analog_l) / 20; // g - сигнал с потенциометра(сигнал задания)
e = g - signal_analog_0; //ошибка текущая
integral += Ki * e * dt; //интегральная составляющая
dif = Kd * (e - e0) * dt; //диф. составляющая
PWM = Kpr * e + integral + dif; //Сигнал на двигатель(ШИМ)
e0 = e; //запоминание ошибки, текущего такта
if(PWM > 55) // ограничение ШИМ сигнала
PWM = 55;
analogWrite(PowA, (int) PWM);
signal_analog_0 = filter(analogRead(analog_0) / 20); // фильтрация сигнала с двигателя
}
```

Вывод. Реализация ПИД-закона регулирования для технических систем не вызывает больших проблем. Наибольшие трудности обусловлены выбором оптимального алгоритма для конкретного объекта и временем квантования.