

УДК 62.503

С.В. Иносов, В.М. Корниенко

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Доказано, что ПИД-алгоритм регулирования близок к предельно достижимому идеалу в реальных условиях автоматического регулирования тепловых процессов. Именно поэтому он используется во всех регулирующих микроконтроллерах и не подвергался усовершенствованию на протяжении почти 100 лет. Попытки заменить ПИД-алгоритм более совершенным обречены на неудачу для типовых промышленных объектов регулирования.

Ключевые слова: тепловые процессы, автоматическое регулирование, ПИД-регулятор, оптимизация

Доведено, що ПІД-алгоритм регулювання близький до гранично досяжного ідеалу в реальних умовах автоматичного регулювання теплових процесів. Саме тому він використовується в усіх регулюючих мікроконтролерах і не змінювався протягом майже 100 років. Спроби замінити ПІД-алгоритм більш досконалим приречені на невдачу для типових промислових об'єктів регулювання.

Ключові слова: теплові процеси, автоматичне регулювання, ПІД-регулятор, оптимізація

It has been proved, that PID control algorithm is close to ultimate ideal in real conditions of automatic regulation of heating processes. That's just why it is used in all regulating microcontrollers and hasn't undergone any upgrading for almost 100 years. Any attempt to substitute PID algorithm for any better one is doomed to failure, for typical industrial plants.

Keywords: thermal processes, automatic control, The PID controller, optimization

Постановка проблемы

Во всех регулирующих микроконтроллерах в подавляющем большинстве случаев используется всего один единственный алгоритм регулирования. Это, так называемый, ПИД-регулятор (Пропорционально – Интегрально – Дифференциальный). Он стал де-факто единственным стандартным промышленным алгоритмом регулирования, который применяется для регулирования любых технологических процессов, в первую очередь, тепловых.

Возникает парадоксальная ситуация. В мире информатики, где все алгоритмы и программы устаревают и обновляются исключительно быстро, существует оазис стабильности и консерватизма. За последние сто лет сменились десятки поколений элементной базы, но количество используемых алгоритмов регулирования не только не возросло, но уменьшилось фактически до одного – ПИД-алгоритма. Регуляторы реализовывались как механические, гидравлические, пневматические, электромеханические, на электронных лампах, на транзисторах, на интегральных микросхемах, на операционных усилителях, наконец, программно.

Но простой ПИД-алгоритм не поддавался усовершенствованию, хотя без малейших затрат можно было бы программно реализовать в тысячу раз более сложный алгоритм. Возникает вопрос, почему? Именно этот вопрос исследуется в данной работе.

Анализ последних исследований и публикаций

Подавляющее большинство систем автоматического регулирования используются в тепловых процессах. Основной задачей автоматике при этом является автоматическое регулирование температуры. Тепловые процессы как объекты регулирования имеют следующие, существенные для синтеза регулятора, особенности.

Все тепловые объекты регулирования аperiodические (то есть не колебательные). Переходная функция таких объектов (реакция на скачок управляющего воздействия) монотонно возрастающая, без колебаний.

Большинство объектов имеют запаздывание. Это запаздывание относительно мало в общей инерционности объекта и не является преобладающим.

Тем не менее, наличие запаздывания является решающим фактором, ограничивающим предельно достижимое качество регулирования.

Уровень зашумленности тепловых объектов относительно мал. Тепловая инерционность сглаживает колебания регулируемой величины. Точность измерения регулируемой величины (как правило, это температура) весьма высока. Это позволяет использовать форсировку переходных процессов на высоких частотах, побочным результатом которой является усиление шумов.

Для регулирования тепловых технологических процессов в подавляющем большинстве случаев используется принцип регулирования по отклонению от задания (рис. 1), с контуром отрицательной обратной связи, реализующим ПИД – алгоритм регулирования [2].

Качество регулирования оценивается по динамическим критериям. Основным из них является время регулирования, которое следует минимизировать за счет правильного выбора алгоритма регулирования и настройки его параметров.

Цель исследования

Желательно прояснить следующие вопросы: Что считать идеальным алгоритмом регулирования? Существует ли такой алгоритм? Является ли он единственным? Реализуем ли он физически? Можно ли создать практичный алгоритм регулирования, близкий к идеальному? Не связан ли ПИД-алгоритм как-либо с идеальным алгоритмом регулирования? Может быть именно поэтому его невозможно улучшить? Поиск ответов на перечисленные вопросы является целью исследования.

Изложение основного материала

На рис. 1 приведена типовая расчетная схема (модель) динамики регулирования. Контур регулирования включает объект регулирования с передаточной функцией $W_0(p)$ и регулятор с передаточной функцией $W_1(p)$.

Передаточные функции являются математическими моделями, которыми традиционно описывают динамические свойства линейных инерционных стационарных объектов [1; 2]. Передаточную функцию можно интерпретировать как формульное представление амплитудо-фазо-частотной характеристики (АФЧХ) объекта, то есть зависимости комплексного коэффициента усиления от частоты. Комплексный аргумент p имеет физический смысл мнимой частоты $j\omega$.

Регулируемая величина (температура) сравнивается с заданием и определяется рассогласование (рис. 1). В зависимости от рассогласования, регулятор корректирует

регулирующее воздействие (мощность нагрева). Внешние возмущения, дестабилизирующие процесс, приведены к эквивалентной модели возмущения, которая добавляется к выходу объекта. Входными воздействиями модели являются изменения задания или возмущения. Если эти воздействия заданы, и заданы передаточные функции объекта и регулятора, модель позволяет рассчитать переходные процессы (аналитически, или частотными методами, или численным моделированием во временной области).

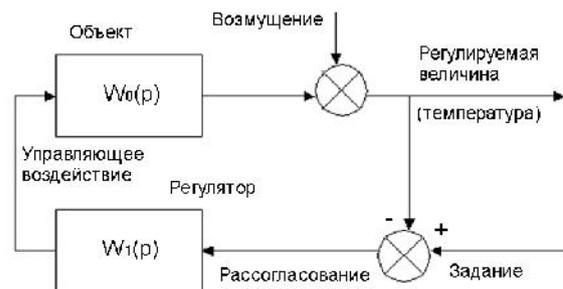


Рис. 1. Типовая расчетная структурная схема динамики регулирования

Типовая передаточная функция теплового объекта (ее мы считаем заданной) имеет вид:

$$W_0(p) = \frac{K \cdot e^{-p \cdot T_3}}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}, \quad (1)$$

где K – статический коэффициент передачи объекта; T_3 – время запаздывания; T_1, T_2 – первая и вторая постоянные времени объекта.

Приведенная модель объекта может считаться универсальной, пригодной для любых тепловых объектов, так как она учитывает все существенные особенности таких объектов: статизм, наличие аperiodических инерционностей (учитываются две основные с постоянными времени T_1 и T_2 .) и наличие запаздывания $e^{-p \cdot T_3}$, которое относительно мало в общей инерционности объекта, но сильно ограничивает запас устойчивости регулирования. Даже если объект не имеет «транспортного» запаздывания, передаточная функция $e^{-p \cdot T_3}$ интегрально учитывает все малые инерционности, не учтенные двумя основными постоянными времени.

Для численных примеров (рис. 2, 3) нужно задать значения параметров объекта. Опираясь на теорию подобия, примем за единицу измерения времени постоянную времени T_2 , (т.е. $T_2=1$), за единицу измерения мощности нагрева примем максимальную мощность нагрева, за единицу измерения температуры примем максимальную температуру нагрева. В этом случае $K=1$. Для оставшихся параметров (безразмерных критериев подобия) примем следующие типичные значения: $T_1=10, T_3=0.2$.

Попробуем синтезировать идеальный алгоритм регулирования (передаточную функцию регулятора $W_I(p)$) для такого объекта. Что считать идеальным алгоритмом регулирования? Очевидно, такой, который абсолютно точно отрабатывает изменения задания. Однако, объект имеет запаздывание на время T_3 , которое физически невозможно скомпенсировать. Наилучшее, что мы можем требовать от физически реализуемого регулятора, это точная отработка любых изменений задания, но с запаздыванием на время T_3 . Большого требовать нельзя, так как скачки задания или возмущения предугадать невозможно. Из этого условия вытекает уравнение:

$$W_{closed}(p) = e^{-pT_3}, \quad (2)$$

где $W_{closed}(p)$ – передаточная функция замкнутого контура регулирования по каналу «задание – регулируемая величина», которая выражается через передаточную функцию разомкнутого контура $W_{open}(p)$ по известной формуле [2]:

$$W_{closed}(p) = \frac{W_{open}(p)}{1 + W_{open}(p)}, \quad (3)$$

$W_{open}(p)$, в свою очередь, определяется передаточными функциями объекта регулирования $W_o(p)$ и регулятора $W_I(p)$ по формуле:

$$W_{open}(p) = W_o(p) \cdot W_I(p). \quad (4)$$

Решая систему предыдущих четырех алгебраических уравнений, найдем искомую передаточную функцию идеального регулятора:

$$W_I(p) = \frac{1}{1 - e^{-pT_3}} (T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1) \cdot \frac{1}{K}. \quad (5)$$

Такая структура передаточной функции регулятора имеет простой физический смысл. Последовательно с объектом включаются два форсирующих звена с передаточными функциями $T_1 p + 1$ и $T_2 p + 1$, которые полностью компенсируют основные апериодические инерционности $1/(T_1 p + 1)$ и $1/(T_2 p + 1)$ в структуре объекта, а также усилительное звено $1/K$, которое компенсирует статический коэффициент передачи K объекта. В результате от передаточной функции объекта остается только запаздывание e^{-pT_3} . Для управления объектом «чистое запаздывание», которое скомпенсировать физически невозможно, регулятор содержит звено с передаточной функцией $1/(1 - e^{-pT_3})$, которое мы будем называть «циклическое интегрирование». По своим динамическим свойствам оно практически идентично обычному интегрированию с передаточной функцией $1/(T_3 p)$ в области низких

частот от 0 до $1/T_3$ (для процессов, медленных по сравнению с T_3). Реакция же этого звена на быстрый импульс (длительностью меньше T_3) представляет собой периодическую последовательность таких же импульсов, что объясняет прилагательное «циклическое».

Итак, идеальный алгоритм регулирования существует и его передаточная функция определена однозначно (5). Его можно трактовать как оптимальный по критерию времени регулирования. Но, так как он был синтезирован не в результате оптимизационной процедуры, а из предельного условия физической реализуемости (2), то мы будем называть его «идеальным».

Если в передаточной функции идеального регулятора (5) заменим «циклическое интегрирование» на обычное интегрирование, то после алгебраических преобразований получим выражение:

$$W_I(p) = \frac{T_1 + T_2}{K \cdot T_3} \cdot \left(\frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2} p + 1 + \frac{1}{(T_1 + T_2)p} \right), \quad (6)$$

Если обозначить

$$\frac{T_1 + T_2}{K \cdot T_3} = K_p \text{ – коэффициент пропорциональности;}$$

$$\frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2} = T_d \text{ – постоянная времени дифференцирования;}$$

$T_1 + T_2 = T_i$ – постоянная времени интегрирования, то получим передаточную функцию обычного ПИД-регулятора, как он описывается в учебниках по теории автоматического управления [1; 2]:

$$W_I(p) = K_p \cdot \left(T_d p + 1 + \frac{1}{T_i p} \right), \quad (7)$$

ПИД-регулятор содержит три параллельных канала – дифференцирующий, пропорциональный, интегрирующий (p – передаточная функция дифференцирования, $1/p$ – передаточная функция интегрирования). Усиление по каналам задается настройкой параметров K_p , T_i , T_d . Оптимальная настройка зависит от параметров объекта K , T_1 , T_2 , T_3 .

Итак, ПИД-алгоритм регулирования получается из идеального заменой «циклического интегрирования» обычным интегрированием.

На рис. 2 сравниваются логарифмические амплитудо-частотные характеристики (ЛАЧХ) идеального регулятора и ПИД-регулятора. Они идентичны на низких частотах, но отличаются в области высоких частот (ЛАЧХ рассчитывается подстановкой $j\omega$ вместо p в соответствующую передаточную функцию $W(p)$ с последующим вычислением модуля полученного выражения).

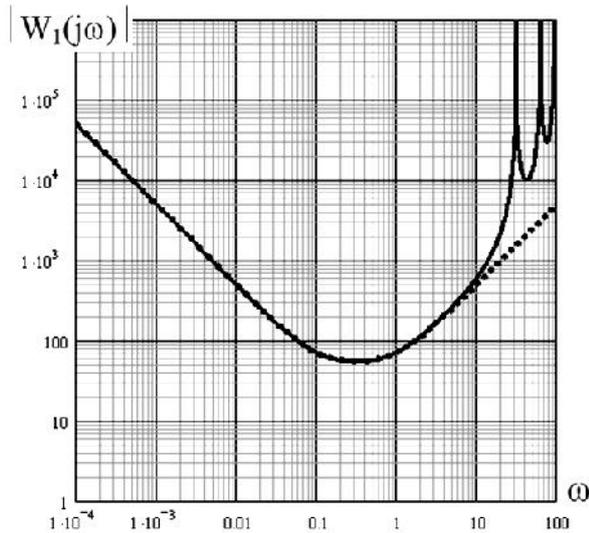


Рис. 2. ЛАЧХ идеального регулятора и ПИД-регулятора (точечная линия)

Как идеальный алгоритм регулирования (формула (5)), так и ПИД-алгоритм (формула (7)) являются некорректными, так как усиление на высоких частотах стремится к бесконечности. Это значит, что высокочастотные шумы, которые всегда присутствуют, забьют на выходе полезный сигнал. Такие передаточные функции считаются физически нереализуемыми (у них степень числителя передаточной функции больше степени знаменателя).

Модификация, превращающая некорректный алгоритм в корректный за счет ограничения усиления в области высоких частот, называется «регуляризацией». Практически, можно допустить коэффициент форсирования высоких частот F в пределах от 2 до 10, в зависимости от уровня зашумленности объекта. Те же самые ЛАЧХ после регуляризации для $F=5$ приведены на рис. 3.

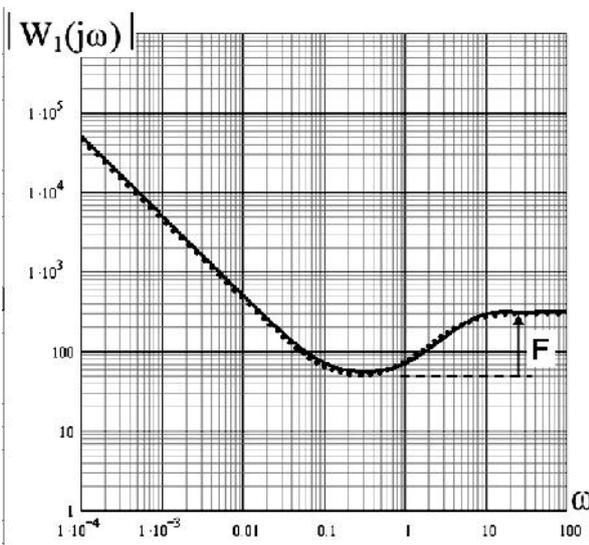


Рис. 3. ЛАЧХ идеального регулятора и ПИД-регулятора (точечная линия) после регуляризации

Как видим, они практически идентичны. Значит, для реальных объектов, когда низкий уровень зашумленности позволяет использовать ограниченную форсировку усиления на высоких частотах, ПИД-регулятор полностью идентичен идеальному регулятору (после регуляризации). Именно поэтому ПИД-регулятор невозможно улучшить – он близок к предельно достижимому идеалу в реальных условиях регулирования тепловых процессов.

Рассмотрим более подробно процесс регуляризации на примере ПИД-регулятора. Идеальное дифференцирующее звено с передаточной функцией p физически нереализуемо, так как степень числителя передаточной функции больше степени знаменателя. Это означает, что усиление высокочастотных шумов (которые всегда есть) стремится к бесконечности с ростом частоты. Для ограничения усиления на высоких частотах добавляется инерционное апериодическое звено с малой постоянной времени T_4 . В результате получим передаточную функцию так называемого «реального дифференцирования»: $p/(T_4 p + 1)$. Оно правильно дифференцирует процессы, медленные по сравнению с T_4 (в диапазоне низких частот от 0 до $1/T_4$). То есть передаточная функция реального ПИД-регулятора на самом деле имеет вид:

$$W_1(p) = K_p \left(\frac{T_d p}{T_4 p + 1} + 1 + \frac{1}{T_i p} \right). \quad (8)$$

По сравнению с формулой (7), реальный ПИД-регулятор обязательно имеет еще один параметр настройки – T_4 . В учебниках эта подробность, как правило, не упоминается. Отношение T_d/T_4 это и есть коэффициент усиления высоких частот (коэффициент форсировки) F (см. рис. 3).

Аналогично, хотя и несколько сложнее, была проведена регуляризация передаточной функции идеального регулятора (5). Но подробности этого процесса несущественны для выводов и практических рекомендаций.

Выводы

Время регулирования не может быть меньше времени запаздывания в объекте регулирования для физически реализуемых систем.

Идеальным алгоритмом регулирования среди физически реализуемых следует считать такой, который абсолютно точно обрабатывает изменения задания, но с запаздыванием, равным запаздыванию в объекте регулирования.

Идеальный алгоритм регулирования существует для типовых объектов регулирования и его передаточная функция определена однозначно.

ПИД-алгоритм регулирования получается из идеального заменой «циклического интегрирования» обычным интегрированием.

ПИД-алгоритм идентичен идеальному в области низких частот.

Оба алгоритма некорректны, и в этом смысле физически нереализуемы, так как усиление стремится к бесконечности с ростом частоты.

После регуляризации (подавления коэффициента усиления высоких частот до реальных значений 2 – 10) оба алгоритма становятся практически идентичными во всем частотном диапазоне.

ПИД-алгоритм не подвергался усовершенствованию на протяжении почти 100 лет именно потому, что он близок к предельно достижимому идеалу в реальных условиях регулирования тепловых процессов. Попытки заменить ПИД-алгоритм более совершенным обречены на неудачу для типовых промышленных объектов регулирования.

Частным случаем ПИД-алгоритма является ПИ-алгоритм (с нулевым усилением в дифференцирующем канале и единичным коэффициентом форсировки высоких частот), который целесообразно использовать, если повышенная зашумленность объекта регулирования не позволяет форсировать переходные процессы на высоких частотах.

Список литературы

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. *Теорія автоматичного керування: Підручник для ВУЗів.* – К.: Либідь, 1997, – 315 с.

2. Євстіфєєв В.О. *Теорія автоматичного керування.* – Ч.1. – *Безперервні лінійні та нелінійні системи: Навчальний посібник для ВУЗів.* – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2006. – 288 с.

Статья поступила в редколлегию 21.03.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.В. Мыслович, Институт электродинамики НАН Украины, Киев.