

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ В ПОМЕЩЕНИЯХ

В.С. Спицын, В.В. Спицын

ALGORITHMS FOR TEMPERATURE CONTROL IN BUILDINGS

V.S. Spitsyn, V.V. Spitsyn

Анализируются алгоритмы управления температурой в помещениях. Приведена методика определения числовых значений параметров П-, ПИ-, ПИД – регуляторов. Описана временная диаграмма адаптивного управления температурой.

Ключевые слова: адаптивный алгоритм, управление температурой, регуляторы.

The article analyzes algorithms for temperature control in buildings. Methods to define numeric values of parameters for P-, PI-, PID controllers are given. Timing diagram of adaptive temperature control is described.

Keywords: adaptive algorithm, temperature control, controllers.

Введение

Оснащение жилых и производственных зданий системами программного управления температурой позволяет сократить затраты энергии на отопление за счет понижения температуры в периоды отсутствия людей и адаптации расхода тепловой энергии к изменению температуры окружающей среды [1].

При разработке систем управления температурой помещения возникает ряд проблем, таких как определение времени, необходимого для подъема температуры для обеспечения заданных значений к требуемому моменту, выбор алгоритма регулирования температуры и определение числовых параметров выбранного алгоритма [2].

1. Цель работы

Анализ алгоритмов управления температурой в помещении, обеспечивающих изменение температуры по задаваемой пользователем программе.

2. Постановка задачи

Задача выбора закона управления и типа регулятора состоит в выборе такого регулятора, который при минимальной стоимости и максимальной надежности обеспечивал бы заданное качество регулирования.

Для того чтобы выбрать тип регулятора и его настройки, необходимо знать статические и динамические характеристики объекта управления, требования к качеству процесса регулирования и

характер возмущений, действующих на процесс регулирования.

Регуляторы с линейным законом регулирования по математической зависимости между входными и выходными величинами подразделяются на следующие виды [3]:

- пропорциональные (П-регуляторы);
- пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы);
- пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регуляторы).

На рис. 1 приведен пример контура регулирования температуры в помещении.

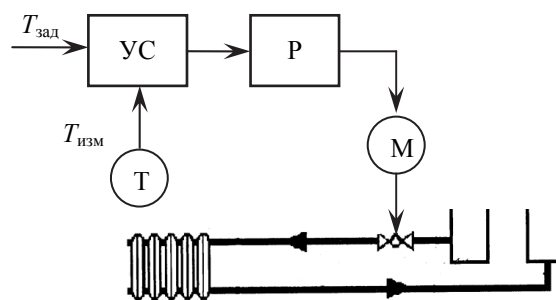


Рис. 1

Температура воздуха поддерживается водяным нагревателем (батареей). Температура в помещении измеряется датчиком (Т), далее эта величина поступает на устройство сравнения (УС) измеренного значения температуры ($T_{изм}$) и заданно-

Спицын Владимир Семенович – доцент кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет; svd@drts.susu.ac.ru

Спицын Василий Владимирович – ст. преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет; cyborg74rus@mail.ru

Vladimir Semenovich Spitsyn – associate professor of Information Communication Technologies Department of South Ural State University; svd@drts.susu.ac.ru

Vasily Vladimirovich Spitsyn – senior lecturer of Information Communication Technologies Department of South Ural State University; cyborg74rus@mail.ru

го ($T_{\text{зад}}$). В зависимости от разности между заданным и измеренным значениями температуры регулятор (Р) вырабатывает сигнал, воздействующий на исполнительный механизм (М – электропривод термклапана).

Электропривод открывает или закрывает клапан до положения, при котором ошибка $\varepsilon = T_{\text{зад}} - T_{\text{изм}}$ будет стремиться к нулю.

Обобщенная структурная схема САР представлена на рис. 2.

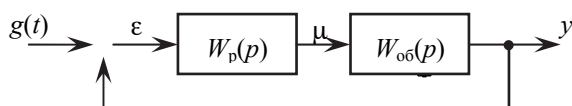


Рис. 2

Комплексный коэффициент передачи (ККП) от рассогласования ε к выходу y определяется выражением $W(j\omega) = W_p(j\omega)W_{об}(j\omega)$, где $W(j\omega)$ – ККП регулятора; $W_{об}(j\omega)$ – ККП объекта регулирования.

3. Законы регулирования

3.1. Пропорциональные регуляторы

Пропорциональные регуляторы (П-регуляторы) имеют один параметр настройки – коэффициент передачи k_p .

ККП регулятора будет $W_p(j\omega) = k_p$, а всей системы

$$W(j\omega) = k_p W_{об}(j\omega). \quad (1)$$

Следовательно, при подключении к объекту П-регулятора ККП системы на каждой частоте увеличивается в k_p раз.

Переходные процессы в П-регуляторе описываются выражением $\mu = k_p \varepsilon$, где ε – входное воздействие на регулятор, равное отклонению регулируемой величины от заданного воздействия; μ – управляющее воздействие регулятора на объект, направленное на ликвидацию отклонения регулируемой величины от заданного значения.

В нашем случае заданное значение – это требуемая величина температуры в помещении в заданное время; отклонение ε – разница между требуемой температурой в помещении и ее значением, замеренным датчиком температуры.

Диапазон изменения выходного сигнала регулятора (ΔU) называется диапазоном регулирования. Диапазон изменения сигнала ошибки ($\Delta \varepsilon$) называют пропорциональным диапазоном.

В П-регуляторах изменяют как диапазон регулирования, так и пропорциональный диапазон (рис. 3).

Из графика (рис. 3) видно, что чем меньше пропорциональный диапазон, тем круче характеристика регулирования.

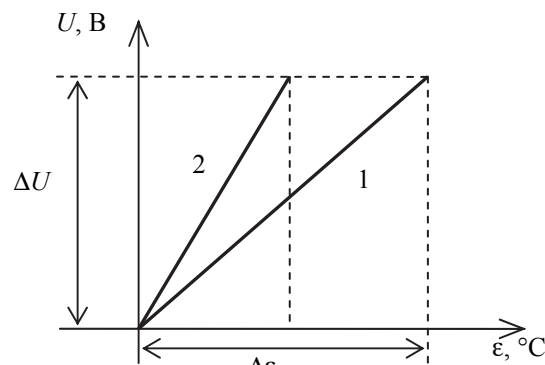


Рис. 3

Величина $k_p = \Delta U / \Delta \varepsilon$ есть коэффициент регулирования. При больших значениях k_p в контуре регулирования могут возникнуть колебания (рис. 4).

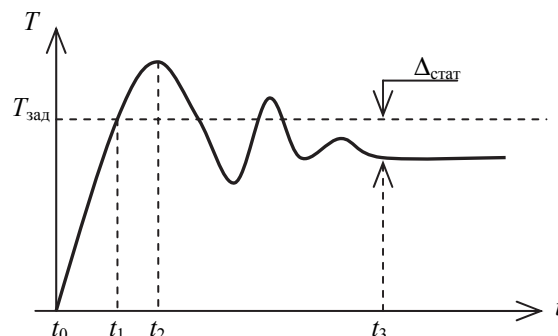


Рис. 4

Например, если во время включения системы температура в помещении $T_{\text{изм}}$ ниже заданной $T_{\text{зад}}$, САР выдает большой сигнал на открытие термклапана. Температура в помещении начнет повышаться. Когда она достигнет $T_{\text{зад}}$, устройство управления выдает команду на закрытие термклапана. Однако из-за того, что батарея разогрета, температура в помещении до момента t_2 будет расти, а затем начнет снижаться. Этот процесс имеет вид затухающих колебаний, и через определенное время t_3 процесс стабилизируется.

После стабилизации из-за инерционности системы всегда будет существовать статическая ошибка $\Delta_{\text{ст}} = T_{\text{зад}} - T_{\text{изм}}$.

Сигнал на выходе устройства управления будет иметь вид $y(t) = U_0 + k_p \varepsilon$, где U_0 – сигнал на выходе устройства управления при $\varepsilon = 0$.

Чем большим выбран пропорциональный диапазон регулирования, тем меньшим будет значение k_p и тем большей будет величина статической ошибки. Если $k_p > 10$, то П-регулятор приемлем по величине статической ошибки и обеспечивает высокое быстродействие.

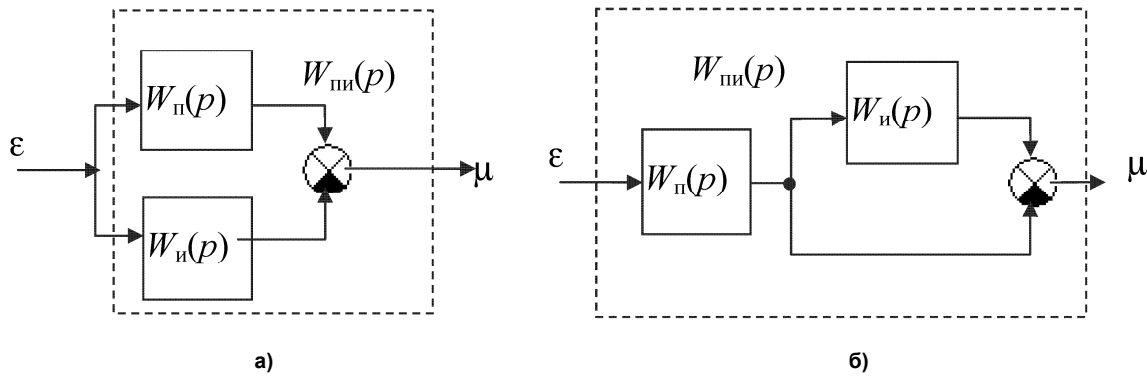


Рис. 5. Структурная схема идеальных ПИ-регуляторов: а) параллельный; б) последовательный

При цифровой реализации П-закона регулирования $Y_i = k_p \varepsilon_i \cdot 100 \%$.

Вне полосы пропорциональности выходной сигнал равен нулю или 100 %.

3.2. Пропорционально-интегральные регуляторы

Статическую ошибку, возникающую при пропорциональном регулировании, можно исключить, если ввести еще и интегральное звено.

ПИ-регулятор оказывает воздействие на регулирующий орган пропорционально отклонению и интегралу от отклонения регулируемой величины:

$$\mu = k_p \varepsilon + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon dt,$$

где T_i – постоянная интегрирования, параметр настройки регулятора.

Передаточная функция параллельного соединения пропорционального и интегрального звена (рис. 5, а):

$$W_{\text{пи}}(p) = k_p + 1/T_i p.$$

Схема на рис. 5, б реализует закон регулирования

$$\mu = k_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T_{\text{из}}} \int_0^t \varepsilon dt \right),$$

где $T_{\text{из}}$ – постоянная времени издромного звена.

Передаточная функция ПИ-регулятора (рис. 5, б) $W_{\text{пи}}(p) = k_p (T_{\text{из}} p + 1) / T_i p$.

При скачкообразном изменении регулируемой величины на значение ε_0 ПИ-регулятор со скоростью, определяемой быстродействием привода, перемещает исполнительный механизм на величину $(k_p \varepsilon_0)$, после чего дополнительно перемещает исполнительный механизм со скоростью ε_0 / T_i .

Следовательно, в ПИ-регуляторе при отклонении температуры в помещении от заданного значения мгновенно срабатывает пропорциональная (статическая) составляющая регулятора, а за-

тем постепенно увеличивается интегральная (астатическая) составляющая.

Переходная характеристика ПИ-регулятора показана на рис. 6 (прямая 1 для параллельной схемы и прямая 2 для последовательной).

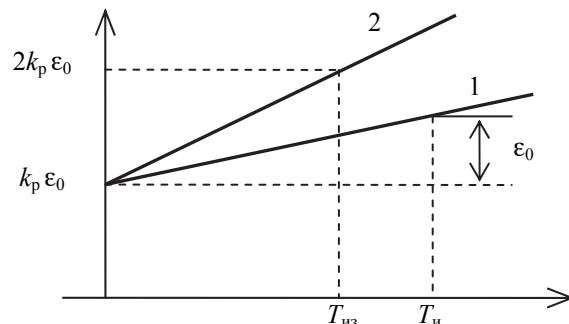


Рис. 6

Параметрами настройки параллельного ПИ-регулятора являются независимые друг от друга коэффициенты усиления k_p и постоянная времени интегрирования T_i .

ПИ-регулятор по последовательной схеме имеет взаимосвязанные параметры настройки статической и астатической частей по коэффициенту k_p . При настройке коэффициента усиления k_p будет изменяться и постоянная времени интегрирования $T_i = T_{\text{из}} / k_p$. $T_{\text{из}}$ – это время, в течение которого от начала действия интегральной составляющей удваивается значение пропорциональной составляющей (рис. 6, прямая 2).

Основными достоинствами ПИ-регулятора являются:

- простота настройки (два параметра k_p, T_i) и возможность оптимизации величины $k_p / T_i \rightarrow \min$, что обеспечивает управление с минимально возможной среднеквадратической ошибкой регулирования;
- малая чувствительность к шумам в канале измерения.

Переходный процесс при ПИ-регулировании показан на рис. 7.

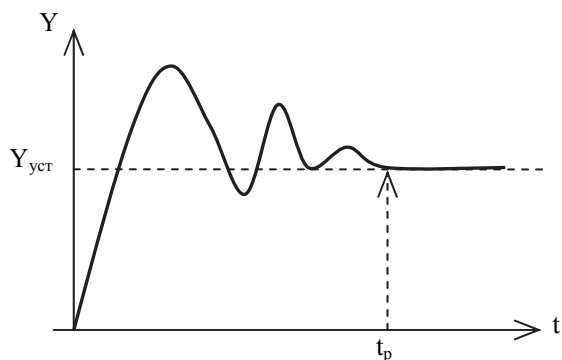


Рис. 7

При цифровой реализации ПИ-закона

$$Y_i = \left[k_p \varepsilon_i + \frac{1}{T_u} \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \Delta t_{\text{изм}} \right] \cdot 100 \%,$$

где $\sum \varepsilon_i$ – накопленная в i -й момент времени сумма рассогласований.

3.3. Пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы

В системах автоматического регулирования возникает необходимость в регуляторе, который вырабатывал бы дополнительное регулирующее воздействие, пропорциональное скорости отклонения регулируемой величины от заданного значения:

$$\mu_d = T_d \frac{d\varepsilon}{dt}.$$

ПИД-регуляторы воздействуют на объект управления пропорционально отклонению регули-

руемой величины, интегралу от этого отклонения и скорости изменения регулируемой величины:

$$\mu = k_p \varepsilon + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt}.$$

По возможностям ПИД-регуляторы являются универсальными. Используя их, можно получить любой закон регулирования. Структурная схема и закон регулирования идеального ПИД-регулятора приведены на рис. 8 (а, б).

При скачкообразном изменении регулируемой величины ПИД-регулятор в начальный момент времени оказывает мгновенное бесконечно большое воздействие на объект регулирования, затем величина воздействия резко падает до значения, определяемого пропорциональной составляющей, после чего постоянно начинает оказывать влияние интегральная составляющая регулятора.

Переходный процесс в ПИД-регуляторах (рис. 8, в) имеет минимальные отклонения по амплитуде и по времени по сравнению с П- и ПИ-регуляторами (т. е. наиболее высокое быстродействие).

Параметрами настройки ПИД-регулятора являются коэффициент пропорциональности регулятора k_p , постоянная времени интегрирования T_u и постоянная времени дифференцирования T_d .

С увеличением запаздывания в системе резко возрастают отрицательные фазовые сдвиги, что снижает эффект дифференциальной составляющей регулятора.

Кроме того, наличие шумов в канале измерения в системе с ПИД-регулятором приводит к значительным случайным колебаниям управляющего

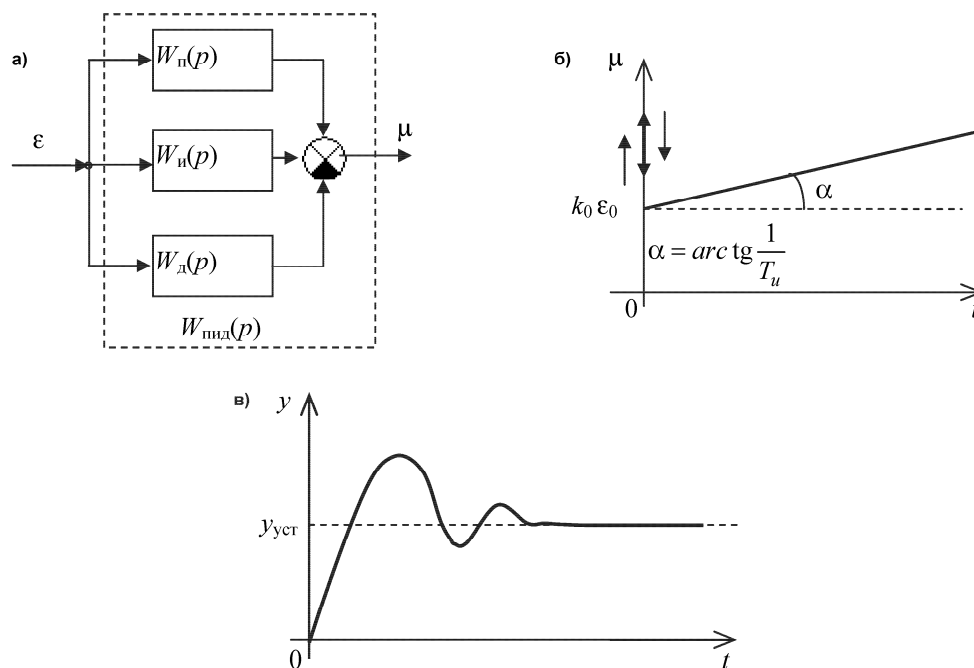


Рис. 8

Значения параметров настройки регулятора

Тип регулятора	Зона пропорциональности	Коэффициент передачи	Постоянная времени интегрирования	Постоянная времени дифференцирования
П-регулятор	$2 P_{ms}$	$0,5 k_{ps}$		
ПИ-регулятор	$2,2 P_{ms}$	$0,45 k_{ps}$	$0,83 T$	
ПИД-регулятор	$1,67 P_{ms}$	$0,6 k_{ps}$	$0,5 T$	$0,125 T$

сигнала регулятора, что увеличивает дисперсию ошибки регулирования и износ исполнительного механизма.

ПИД-регуляторы позволяют обеспечить для систем регулирования температуры хорошее качество регулирования: рассогласование регулирования менее 1 % от заданной точки, достаточно малое время выхода на режим и невысокую чувствительность к внешним возмущениям.

Следует иметь в виду, что при неточном задании параметров настройки ПИД-регулятор может ухудшить показатели по сравнению с другими типами регуляторов и даже перейти в режим автоколебаний.

При цифровой реализации ПИД-закон имеет вид

$$\mu = \left[k_p \varepsilon_i + \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^n \varepsilon_i \Delta t_{изм} + T_d \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta t_{изм}} \right] 100 \%.$$

4. Настройка П-, ПИ- и ПИД-регуляторов

Циглер и Николс (J.G. Ziegler и N.D. Nicholc) при исследовании переходных процессов в САР установили закономерность, заключающуюся в том, что оптимальная зона пропорциональности П-регулятора, как правило, в два раза больше величины зоны пропорциональности, при которой в САР начинается автоколебательный процесс. Кроме того, они также определили зависимость между периодом возникающих автоколебаний и постоянными времени интегрирования и дифференцирования. Благодаря найденным соотношениям, появилась возможность быстро и просто настраивать П-, ПИ- и ПИД-регуляторы, не прибегая к сложным расчетам.

Ниже приводится процедура определения параметров настройки названных регуляторов по методу Циклера–Николса.

1. Выставляем время интегрирования и дифференцирования на ноль.

2. Выставляем широкую зону пропорциональности регулятора и наблюдаем переходный процесс в САР.

3. Постепенно уменьшая зону пропорциональности, выходим на значение, при котором начинается автоколебательный процесс с постоянной амплитудой.

4. Измеряем период колебаний T .

5. Постоянно увеличивая зону пропорциональности, находим пороговое значение, при ко-

тором регулятор переходит в режим затухающих колебаний. Это зона пропорциональности для максимальной чувствительности регулятора P_{ms} .

6. Пользуясь таблицей, вычисляем значения параметров настройки регулятора.

7. Выставляем полученные значения для зоны пропорциональности, постоянной времени интегрирования и постоянной времени дифференцирования.

8. Проверяем работу регулятора и при необходимости осуществляем подстройку параметров.

5. Адаптивное управление температурой

Программа управления температурой должна позволять прогнозировать время, необходимое для подъема температуры в помещении от экономной (при отсутствии людей в помещении) до комфортной в зависимости от характеристик помещений, температуры наружного воздуха и температуры в смежных помещениях. Это позволяет адаптировать программу изменения температуры в помещениях в зависимости от изменения внешних условий.

Временная диаграмма управления тепловым режимом, обеспечивающего понижение температуры при отсутствии людей и комфортные условия в помещении к моменту их прибытия, приведена на рис. 9.

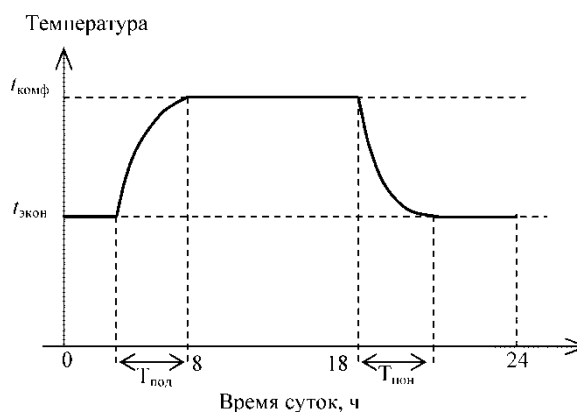


Рис. 9

Программу регулирования температуры можно описать следующим образом. После ухода персонала в помещении поддерживается пониженная температура.

На основании данных о внешних условиях рассчитывается время, необходимое для подъема температуры $T_{\text{под}}$ от пониженной до комфортной к моменту прибытия персонала. Затем в течение рабочего дня поддерживается это значение температуры или значение, установленное вручную на пульте управления САР.

Выводы

1. Предполагаемые алгоритмы управления температурой в помещении позволят экономить тепловую энергию при обеспечении комфортных условий пребывания людей.

2. Алгоритмы и методика определения числовых значений параметров, определяющих качество регулирования температуры, могут быть по-

ложены в основу создания модели САР температурой в помещении.

3. Отработанные на модели алгоритмы предполагается реализовывать в опытных образцах системы управления температурой в помещениях.

Литература

1. Гершкович, В.Ф. *Энергосберегающие системы жилых зданий: пособие по проектированию* / В.Ф. Гершкович // С.О.К. – 2008. – № 8.

2. Нимич, Г.В. *Общие положения автоматического управления системами кондиционирования и вентиляции* / Г.В. Нимич // С.О.К. – 2005. – № 7.

3. *Теория автоматического управления* / А.А. Воронов, Д.П. Ким, В.М. Лохин и др. – М.: Высшая школа, 1986.

Поступила в редакцию 15 августа 2012 г.