

УДК 681.5

## СИНТЕЗ КОМПЕНСАТОРА ВОЗМУЩЕНИЯ В КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ В ЦЕПИ ОСНОВНОГО КАНАЛА

М.Х. ШЕЙХ ЭЛЬ НАЖЖАРИН, \*А.Г. СЕНЬКОВ, Н.Н. ГУРСКИЙ

*Белорусский национальный технический университет  
Независимости, 65, Минск, 220013, Беларусь*

*\*Белорусский государственный аграрный технический университет  
Независимости, 99, Минск, 220023, Беларусь*

*Поступила в редакцию 27 марта 2015*

Предложена структурная схема комбинированной системы автоматического регулирования аperiodического объекта 1-го порядка с ПИД-законом регулирования по основному каналу и цепью компенсации изменения возмущающего воздействия, реализованной на основе двух дополнительных ПИД-регуляторов.

*Ключевые слова:* автоматическое регулирование, ПИД-регулятор.

### Введение

Комбинированные системы автоматического регулирования (САР) часто используются в теплоэнергетике и сочетают принцип регулирования по отклонению и компенсации измеряемого возмущения. Синтез комбинированной САР включает в себя два этапа: синтез основной САР по отклонению и синтез передаточной функции компенсатора измеряемого возмущения. При этом необходимо учитывать требования, предъявляемые к устойчивости и качеству регулирования САР, а также необходимое условие физической реализуемости САР, что возможно не всегда при попытке добиться абсолютной инвариантности САР к изменениям возмущающего воздействия.

В данной работе на примере системы регулирования температуры в климатической камере показана возможность синтеза комбинированной САР, инвариантной к изменениям возмущающего воздействия, с использованием ПИД-регулятора в качестве компенсатора измеряемого возмущения. Путем численного моделирования выполнен анализ качества регулирования предлагаемой схемы САР.

### Основная часть

Структурная схема комбинированной односвязной САР температуры воздуха в помещении показана на рис. 1. Как следует из приведенной на рис. 1 структурной схемы САР, передаточная функция САР по возмущающему воздействию равна:

$$W^f(s) = \frac{\theta(s)}{\theta^f(s)} = \frac{W_{obj}^f - W_d^f \cdot W_{reg}^f \cdot W_{iu} \cdot W_{obj}^u}{1 + W_d \cdot W_{reg} \cdot W_{iu} \cdot W_{obj}^u}. \quad (1)$$

Условие инвариантности САР относительно изменений возмущающего воздействия сводится к уравнению:

$$W_{obj}^f - W_d^f \cdot W_{reg}^f \cdot W_{iu} \cdot W_{obj}^u = 0. \quad (2)$$

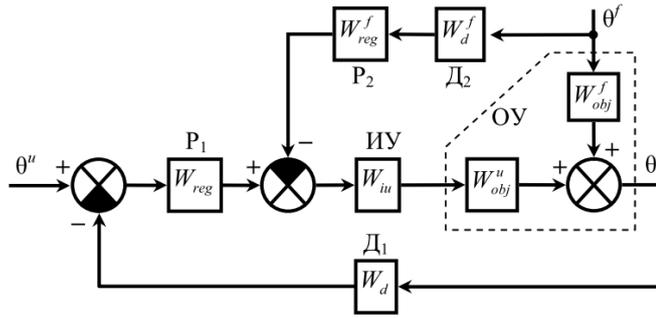


Рис. 1. Структурная схема комбинированной САР температуры в климатической камере; ОУ – объект управления – климатическая камера;  $\theta$ , °С – изменение температуры воздуха в камере (управляемая величина);  $\theta^u$ , °С – изменение требуемого значения температуры (задающее воздействие);  $\theta^f$ , °С – изменение наружной температуры (возмущающее воздействие); ИУ – исполнительное устройство;  $D_1$ ,  $D_2$  – датчики температуры;  $P_1$ ,  $P_2$  – регуляторы

Отсюда получается следующее выражение для передаточной функции регулятора  $P_2$  (компенсатора измеряемого возмущения):

$$W_{reg}^f = \frac{W_{obj}^f}{W_d^f \cdot W_{iu} \cdot W_{obj}^u}. \quad (3)$$

Передаточная функция  $W_{reg}^f$  регулятора  $P_2$ , таким образом, не зависит от передаточной функции  $W_{reg}$  регулятора  $P_1$ , а определяется динамическими характеристиками самого объекта управления, а также датчика температуры и исполнительного устройства. В то же время, знаменатель в выражении (1), являющийся характеристическим полиномом САР, не зависит от характеристик элементов  $D_2$ ,  $P_2$  цепи компенсации возмущающего воздействия. Поэтому значения корней характеристического уравнения САР, а, следовательно, такие показатели качества регулирования, как устойчивость, запас устойчивости, колебательность, будут определяться характеристиками элементов, входящих в основную цепь регулирования (по отклонению).

В качестве регулятора  $P_1$ , таким образом, может использоваться ПИД-регулятор. Настройка значений его параметров  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  может быть выполнена методами компьютерного моделирования по переходной функции САР по задающему воздействию. Для этого можно использовать, например, компьютерный пакет динамического моделирования Simulink и входящий в его состав компонент NCD Outport, реализующий графический интерфейс для настройки параметров динамических систем [1].

Приближенное математическое описание статических и динамических характеристик элементов систем кондиционирования воздуха основано на применении методов идентификации [2]. Анализ приводимых в различных литературных источниках данных [3, 4], позволяет использовать инерционное звено 1-го порядка для математического описания датчиков температуры, исполнительного устройства и объекта управления рассматриваемой САР.

Выражения для передаточных функций климатической камеры, соответственно, по управляющему и возмущающему воздействиям, таким образом, имеют вид:

$$W_{obj}^u = \frac{K^u}{T \cdot s + 1}, \quad (4)$$

$$W_{obj}^f = \frac{K^f}{T \cdot s + 1}, \quad (5)$$

где  $K^u$ ,  $K^f$  – коэффициенты преобразования (усиления);  $T$ , с – постоянная времени объекта управления.

Коэффициент  $K^f$ , как следует из схемы на рис. 1, является безразмерной величиной, так как связывает изменение наружной температуры с изменением температуры внутри камеры. Размерность коэффициента  $K^u$  будет зависеть от типа исполнительного устройства.

Исполнительное устройство как динамическое звено также может быть представлено инерционным звеном 1-го порядка:

$$W_{iu} = \frac{K_{iu}}{T_{iu} \cdot s + 1}, \quad (6)$$

где  $K_{iu}$  – коэффициент преобразования (усиления);  $T_{iu}, c$  – постоянная времени исполнительного устройства.

Данные, приведенные в [3, 4], говорят о возможности такого приближения как для электронагревателей, так и для поверхностных теплообменных аппаратов.

Передаточные функции обоих датчиков температуры имеют вид [3]:

$$W_d(s) = W_d^f(s) = \frac{1}{T_d \cdot s + 1}, \quad (7)$$

где  $T_d, c$  – постоянная времени датчика.

Подставляя (4) – (7) в выражение (3), получим:

$$W_{reg}^f = \frac{K^f \cdot (T_d \cdot s + 1)(T_{iu} \cdot s + 1)}{K_{iu} \cdot K^u}. \quad (8)$$

Передаточная функция (8) может быть реализована путем последовательного соединения двух ПИД-регуляторов:

$$W_{reg}^f = \left( K_{p1}^f + K_{i1}^f \cdot \frac{1}{s} + K_{d1}^f \cdot s \right) \cdot \left( K_{p2}^f + K_{i2}^f \cdot \frac{1}{s} + K_{d2}^f \cdot s \right), \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} K_{i1}^f &= K_{i2}^f = 0; \\ K_{p1}^f &= K^f / K^u; \\ K_{p2}^f &= 1 / K_{iu}; \\ K_{d1}^f &= K^f \cdot T_d / K^u; \\ K_{d2}^f &= T_{iu} / K_{iu}. \end{aligned} \quad (10)$$

Проверка реализуемости предложенной схемы САР, а также оценка качества регулирования выполнялись методом компьютерного моделирования с использованием компьютерного пакета динамического моделирования Simulink [1]. В качестве объекта управления рассматривался лабораторный учебный сушильный шкаф «ШСУ», имеющий объем сушильной камеры 10 л. Значения параметров передаточных функций (4), (5) компьютерной модели объекта были определены экспериментально в результате процедуры идентификации. Изображение компьютерной динамической модели САР показано на рис. 2, а значения параметров передаточных функций элементов САР приведены в таблице.

На первом этапе исследования САР с помощью реализованного в Simulink компонента NCD Outport был выполнен синтез ПИД-регулятора  $P_1$  по основному каналу. Настройка коэффициентов ПИД-регулятора  $P_1$  производилась по задающему ступенчатому воздействию на переходный процесс с 20%-м перерегулированием. Полученные значения коэффициентов  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  приведены в таблице. Далее по формулам (10) были рассчитаны значения коэффициентов ПИД-регуляторов  $P_2(1)$  и  $P_2(2)$ . В качестве регуляторов  $P_1$ ,  $P_2(1)$ ,  $P_2(2)$  использовались компьютерные модели реального ПИД-регулятора [1] (компонент PID(2) Controller), в которых дифференцирующая составляющая аппроксимируется звеном вида  $s/(s/N+1)$ .

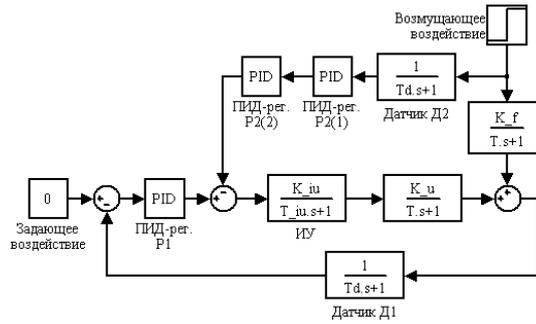


Рис. 2. Динамическая компьютерная Simulink-модель САР температуры в климатической камере

**Значения параметров передаточных функций элементов моделируемой САР**

Звено	Параметр	Значение	Единица измерения
Объект управления	$K^u$	0,23	$^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$
	$K^f$	1	
	$T$	800	с
Датчики температуры	$T_d$	20	с
Исполнительное устройство – электронагреватель	$K_{iu}$	1	Вт/В
	$T_{iu}$	50	с
ПИД-регулятор $P_1$ (по отклонению)	$K_p$	17,28	В/ $^{\circ}\text{C}$
	$K_i$	0,02	В/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{с})$
	$K_d$	0,32	(В·с)/ $^{\circ}\text{C}$
ПИД-регулятор $P_2(1)$	$K_{p1}^f$	4,35	В/ $^{\circ}\text{C}$
	$K_{d1}^f$	86,96	(В·с)/ $^{\circ}\text{C}$
ПИД-регулятор $P_2(2)$	$K_{p2}^f$	1	В/ $^{\circ}\text{C}$
	$K_{d2}^f$	50	(В·с)/ $^{\circ}\text{C}$

На рис. 3 (кривая 1) показана полученная методом компьютерного моделирования переходная функция рассматриваемой САР по возмущающему воздействию. Так как в качестве исполнительного устройства предполагалось использование электронагревателя с максимальной мощностью 100 Вт, то на моделируемый переходный процесс было наложено соответствующее ограничение, при котором максимальное по модулю изменение выделяемой электронагревателем мощности не должно было превышать 50 Вт.

Для сравнения на рис. 3 (кривая 2) показана переходная функция по возмущающему воздействию для САР без цепи компенсации измеряемого возмущения, т.е. с регулированием только по отклонению.

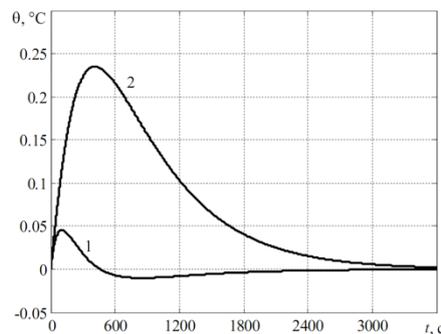


Рис. 3. Переходные функции по возмущающему воздействию для САР с комбинированным регулированием (кривая 1) и с регулированием по отклонению (кривая 2)

Таким образом, как видно из рис. 3, использование комбинированного управления позволяет улучшить качество регулирования системы при изменении возмущающего воздействия. Предложенный в данной работе способ компенсации возмущений на основе ПИД-регуляторов облегчает возможность его практической реализации.

# SYNTHESIS OF FEEDFORWARD COMPENSATOR IN THE COMBINED SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL WITH PID-REGULATION ON THE MAIN CHANNEL CIRCUIT

M.H. CHEIKH EL NAJJARINE , A.G. SENKOV, N.N. HURSKI

## Abstract

An automatic control system for the 1st order aperiodic object is suggested. The structural scheme includes main control circuit with a PID-regulator in it and a disturbance compensation circuit realized by two additional PID-regulators.

## Список литературы

1. *Ощепков А.Ю.* Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB. СПб, 2013.
2. *Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М.* Экспериментальное определение динамических характеристик объектов управления. М., 1967.
3. *Сотников А.Г.* Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции. Л., 1984.
4. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Под общ. ред. Е.С. Бондаря. Киев, 2005.