

УДК 628.84:681.142.004

Цифровой программируемый регулятор для СКВ

Канд. техн. наук В.В.ВЫЧУЖАНИН
ОНМУ

Results of the development and investigation of the digital local combined regulator for air conditioning system are presented. The regulator is implemented in the program of the logic integral circuit FPGA.

В системах кондиционирования воздуха (СКВ) широкое распространение получили поверхностные тепло-массообменные аппараты (воздухонагреватели и воздухоохладители). Целью автоматического управления тепло-массообменными аппаратами является создание и поддержание заданных параметров микроклимата в обслуживаемых помещениях при непрерывном действии внешних и внутренних возмущений. Управление расходом теплоносителя в аппарате является наиболее распространенным способом управления.

При автоматизации СКВ проектировщики идут по пути применения типовых решений. Примером такого решения является широко используемый судовой центральный кондиционер КВ типа «Бриз» [7]: средненапорный, централизованного тепло- и хладоснабжения, с поверхностными воздухоохладителем и двухступенчатыми воздухонагревателями. В качестве приборов автоматики используются пропорциональные регуляторы температуры прямого действия (РТВ), а также терморегулирующие вентили (ТРВ). Несмотря на простоту и дешевизну используемых регуляторов температуры прямого действия, они обладают рядом существенных недостатков. Скорость распространения сигнала на большие расстояния в этих системах, особенно при их использовании в двухуровневых (иерархических) автоматических системах управления, ограничена. Из-за запаздывания сигналов в линиях связи ухудшается качество регулирования. Кроме того, регуляторы температуры прямого действия в отличие от регуляторов других типов имеют ограничения по температурным перегрузкам (при изменении нагрузки на регулятор его расходные характеристики изменяются и становятся нелинейными).

В настоящее время при разработке устройств контроля и управления в области автоматизации технологических процессов постоянно появляются новые решения. Это касается прежде всего алгоритмов функцио-

нирования и управления, структур и составов технических средств, объемов и распределения функций контроля, регулирования и управления, объемов и способов представления информации, роли математических моделей и моделирования.

Технические системы современного уровня создаются на основе широкого использования специальных программных средств систем автоматического управления. Такие системы состоят из ступеней, образующих иерархические уровни [1]. На высших уровнях автоматизируются системы и процессы, имеющие достаточно сложный и общий характер, а на нижних – локальные системы. Анализ и синтез локальных автоматических систем регулирования (АСР), входящих в общую структуру двухуровневой системы, являются обязательной составной частью общего процесса разработки автоматизированной СКВ. Автоматическая стабилизация выходных переменных состояния в условиях нестационарности тепло-массообмена осуществляется изменением потоков в аппаратах путем использования специальных локальных АСР. Локальные АСР обычно имеют один или два контура автоматической стабилизации выходных переменных состояния подсистем. Они обладают свойством независимости движения каждой из регулируемых переменных от изменения координат совместно работающих систем.

При создании автоматических и автоматизированных систем различного назначения в качестве их вычислительной основы используются средства цифровой техники: устройства с жесткой структурой, выполненные на базе цифровых технологических схем; универсальные и управляющие электронные вычислительные машины; микропроцессорная техника; устройства программной логики.

Совершенствование технологии производства интегральных полупроводниковых компонентов, обеспечивающее возможность создания высокоэкономичных циф-

ровых устройств обработки и хранения информации, а также появление эффективных средств программирования оказывает все более существенное влияние на развитие техники измерений и управления. На основе цифровых регуляторов могут быть построены системы управления любых типов. Программное обеспечение подобных систем можно без труда корректировать как в предпусковой период, так и в процессе их эксплуатации. Немаловажно и то, что цифровые регуляторы позволяют изменять их параметры в широких диапазонах и способны работать с практически любыми периодами квантования.

Формирование и развитие микропроцессорной техники способствовали широкому использованию программируемой логики при проектировании цифровых систем. Если разработчик систем на основе устройств с жесткой структурой может пользоваться для реализации необходимых функций только аппаратными средствами, а при использовании ЭВМ – в большей степени только программными средствами, то при построении систем на основе программируемой логики он получает в свое распоряжение полностью как аппаратные, так и программные средства.

Развитием программируемой логики стало появление программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), представляющих собой платформу для создания реконфигурируемых и высокопроизводительных цифровых систем и устройств с минимальными материальными затратами и сокращением времени на проектирование. Ведущие производители ПЛИС, внедряя передовые технологии, выпускают схемы, обладающие повышенным быстродействием и все большим количеством вентиляльных элементов, низким энергопотреблением и небольшой ценой [2]. По принципу формирования требуемой структуры цифрового устройства ПЛИС относят преимущественно к двум группам: CPLD – комплексные программируемые логические устройства, энергонезависимые и с некоторым ограничением допустимого числа перезаписи содержимого и FPGA – программируемые пользователем вентиляльные матрицы, не имеющие ограничений по числу перезаписей. Цифровая автоматическая система регулирования (АСР) на ПЛИС обладает особенностями, отличающими ее от аналоговых систем: законы управления реализуются в форме алгоритмов, запрограммированных с помощью аппаратных или программных средств; обрабатываются квантованные (дискретные во времени) сигналы; сигналы могут принимать толь-

ко определенные дискретные значения вследствие квантования по амплитуде. Разрабатываемая автоматическая система регулирования (АСР) для центральных кондиционеров должна соответствовать следующим требованиям:

- минимальное влияние возмущающих воздействий на параметры воздуха на выходах технологических аппаратов;
- максимальная точность воспроизведения управляющих воздействий;
- максимальная точность поддержания требуемых значений параметров воздуха на выходах из технологических аппаратов.

При разработке алгоритма управления локальной системой цифрового управления для АСР теплообменными аппаратами центрального кондиционера [1] решалась задача стабилизации параметров процессов воздухообработки на заданных уровнях в условиях изменяющихся внешних воздействий, к которым относятся изменения одного из термодинамических параметров воздуха, например теплосодержания.

В качестве объектов регулирования (ОР) выбраны теплообменники аппараты неавтономного центрального кондиционера типа КВ (ТУ УЗ.01–14308032–121–98) АОО «Завод «Экватор», описываемые передаточными функциями первого порядка [6]. Дискретная форма записи каждого ОР по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий имеет вид

$$\begin{aligned} y_1(k) &= -a_1 y_1(k-1) + b_1 f(k); \\ y_2(k) &= -a_2 y_2(k-1) + b_2 u f(k), \end{aligned} \quad (1)$$

где y – регулируемый параметр;

$k = 1, 2, 3, \dots$ номер периода квантования;

$a_1 = -\exp(-T_k/T_1)$; $b_1 = K_{01}/T_1$;

$a_2 = -\exp(-T_k/T_2)$; $b_2 = K_{02}/T_2$;

f – возмущающее воздействие;

u – управляющее воздействие;

T_k – период квантования (по Циглеру – Николсу

$T_k = 0, 1 T_{кр}$), с;

K_{01}, K_{02} – соответственно коэффициенты передачи возмущающих и управляющих воздействий ОР;

T_1, T_2 – соответственно постоянные времени по каналам передачи возмущающих и управляющих воздействий ОР, с.

Для того чтобы цифровая АСР обладала свойствами, близкими к свойствам аналоговой АСР, период квантования T_k выбирается достаточно малым.

Во многих случаях при построении алгоритмов управления динамическими процессами исходят из принципов действия хорошо исследованных классических линейных аналоговых регуляторов:

- пропорционального (П);
- пропорционально-интегрального (ПИ);
- пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД).

Несмотря на то, что наиболее распространенными являются ПИ- и ПИД-алгоритмы, для цифровых систем регулирования часто используется более простой в реализации П-закон регулирования.

Алгоритм цифрового П-регулятора, формирующего управляющее воздействие, легко вывести, используя соотношение, приведенное в работе [8]:

$$u_1(k) = K_p e(k), \quad (2)$$

где $e(k) = y(k) - y_0$ – отклонение выходной переменной от заданного значения;

K_p – коэффициент передачи П-регулятора.

В целях обеспечения минимальных динамического отклонения регулируемого параметра и ошибки регулирования оптимальное численное значение коэффициента передачи K_p определяют моделированием с учетом реальных параметров ОР [6].

Исследования цифровой одноконтурной АСР, реализующей алгоритм управления (2), в MATLAB 6.5 – Simulink показали наличие статической ошибки регулирования, превышающей допустимые пределы. Проведение синтеза оптимального регулятора, дающего максимальные показатели качества регулирования, экономически не оправдано.

Для обеспечения требуемых показателей качества на основе использования прямого метода Ляпунова проведен синтез комбинированной АСР. В его основу положены методы, используемые при аналитическом конструировании комбинированных систем регулирования. При этом учитывались реальные динамические свойства технологического оборудования центрального кондиционера [6]. В целях компенсации возмущающих воздействий проведен синтез корректирующего звена АСР. Для решения поставленной задачи использовалась функция, минимизирующая разность между возмущающим и управляющим сигналами [4].

Для малых периодов квантования алгоритм цифрового управления, записанный в конечных разностях с учетом приращения управляющего сигнала от корректирующего звена,

$$u_2(k) - Au_2(k-1) = Bf(k) + Cy_0, \quad (3)$$

где $A = 1/(1 + T_k\rho)$;

$$B = T_k\rho K_{01}/(1 + T_k\rho);$$

$$C = T_k\rho M/(1 + T_k\rho);$$

ρ – константа, определяемая экспериментально, c^{-1} ;

M – масштабный коэффициент.

В соответствии с (2) и (3) в комбинированной локальной цифровой АСР к исполнительному органу ОР приложено управляющее воздействие

$$u(k) = u_1(k) + u_2(k). \quad (4)$$

Алгоритм работы всей цифровой системы управления при использовании цифрового модуля ОР

$$y(k) = a_1 y_1(k-1) + b_1 f(k) + a_2 y_2(k-1) + b_2 u_1 f(k);$$

$$e(k) = y(k) - y_0;$$

$$u(k) = K_p e(k) + Au_2(k-1) + Bf(k) + Cy_0;$$

$$\Delta y(k-1) = \Delta y(k);$$

$$e(k-1) = e(k);$$

$$u(k-1) = u(k).$$

Структурная схема замкнутой цифровой комбинированной системы управления воздушонагревателем автономного центрального кондиционера по теплосодержанию воздуха представлена на рис. 1. Заданное значение регулируемого параметра y_0 должно соответствовать Санитарным нормам и правилам эксплуатации СКВ. Исследование качества регулирования в разработанной АСР осуществлено моделированием в MATLAB 6.5 – Simulink. При моделировании использовались ко-

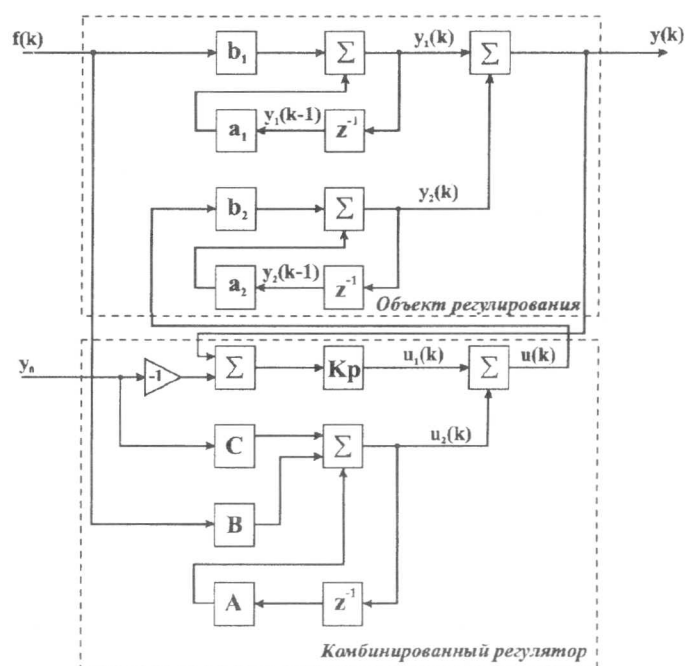


Рис. 1. Структурная схема замкнутой цифровой комбинированной системы управления

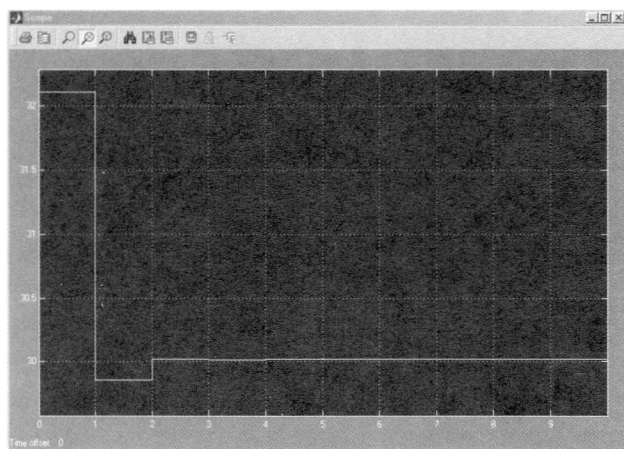


Рис.2. Переходной процесс в комбинированной цифровой АСР при изменении задающего сигнала

Эффективности передачи реального воздушонагревателя $K_{01} = 0,421 \pm 0,06$ и $K_{02} = 0,813 \pm 0,17$ кДж/(кг%); постоянные времена $T_1 = 1,4 \pm 0,3$ и $T_2 = 6,1 \pm 1,2$ с; коэффициент передачи П-регулятора $K_p = 98,90$; $\rho = 12,50$ с⁻¹; период квантования T_k (оператор запаздывания $Z^{-1} = T_k$) выбран равным 1 с. График переходного процесса в комбинированной цифровой АСР воздушонагревателя при изменении возмущающего воздействия по теплосодержанию воздуха перед теплообменным аппаратом кондиционера приведен на рис 2. Установившийся режим при использовании комбинированной АСР в отличие от системы, реализующей П-закон регулирования, характеризуется минимальной статистической ошибкой и меньшим временем регулирования. Максимальное значение перерегулирования не превышает 5 – 7 %, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к подобным АСР. На основании экспериментальных исследований работы комбинированной АСР выявлена существенная роль выбираемого периода квантования T_k . На выбор периода квантования значительно влияет динамика объекта регулирования, поскольку она определяет как структуру передаточной функции, так и ее постоянные времена. При относительно малых значениях T_k (1 с) переходный процесс практически совпадает с процессами в непрерывной комбинированной АСР. Для $T_k = 3$ с качество переходного процесса еще можно считать вполне удовлетворительным, но при T_k более 5 с оно становится неудовлетворительным. При переходе к дискретной форме (3) возникает погрешность, величина которой пропорциональна остаточному члену ряда Тейлора функции $e(t)$. Проведенные исследования показали, что $e(t)$ мало изменяется в пределах периода квантования. Поэтому полученные дис-

кретные уравнения (2) и (3) можно считать эквивалентными непрерывным. Условие устойчивости АСР определялось расчетным путем по критерию Гурвица. Результаты расчета свидетельствуют об устойчивости замкнутой системы регулирования.

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что разработанная локальная цифровая АСР обладает высокими эксплуатационными характеристиками, соответствующими предъявляемым к ней требованиям.

Разработанная схема цифрового комбинированного регулятора реализована в ПЛИС фирмы Altera проектированием устройства в САПР Quartus II 4.1 [9]. Система проектирования полноцикловая, поддерживающая сквозной процесс от ввода и контроля описания до программирования микросхемы и представляющая собой архитектурно независимую среду проектирования.

Файл описания проекта создается в текстовом редакторе пакета. Описание проекта цифрового регулятора, реализуемого на основе ПЛИС, осуществлено на формальном входном языке САПР VHDL. Язык VHDL обычно используется для моделирования проектируемой цифровой системы на алгоритмическом и логическом этапах проектирования. VHDL позволяет создавать свои типы данных, имеет широкий набор арифметических и логических операций [10]. После отладки компонентов схемы на основе созданных при компиляции выходных файлов осуществлено моделирование работы проекта с помощью подсистемы (Simulator) пакета Quartus II 4.1. При этом проверялись логические операции и внутренние временные соотношения проекта. Компиляция выполнена с учетом заданных требований:

- обеспечения требуемых временных характеристик проекта;
- увеличения быстродействия;
- оптимизации используемых ресурсов ПЛИС.

В результате компиляции создан файл для программирования и конфигурирования ПЛИС Altera. При компиляции проекта выбрана ПЛИС FPGA семейства Cyclone, устройство EP1C4F324C6.

Функциональным моделированием проверена пра-

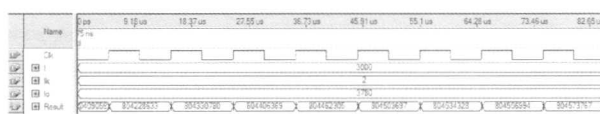


Рис.3. Результаты моделирования цифрового комбинированного регулятора на ПЛИС

тельность описания и логического функционирования проекта. Фрагмент файла с результатами моделирования цифрового регулятора в зависимости от кодов входного сигнала и соответствующих коэффициентов показан на рис. 3.

Проверка АСР, реализованной в ПЛИС, моделированием в САПР подтвердила правильность ее функционирования.

Микросхемы семейства FPGA не имеют энергонезависимой памяти, и поэтому необходимо выполнять их программирование при каждом включении питания. В законченных устройствах для конфигурирования таких микросхем используют внешние конфигурационные ПЗУ. При этом используется режим конфигурирования «PS» (Passive Serial – пассивный последовательный режим). В устройствах, имеющих связь с компьютером, а также при отладке проекта удобно использовать программатор «ByteBlasterMV», который подключается к компьютеру с помощью стандартного LPT-порта. Но есть возможность конфигурирования FPGA и без использования LPT-порта (с помощью USB). При этом применяют микросхему FT2232C компании FTDI, представляющую собой преобразователь потока данных USB в поток последовательных/параллельных данных. Режимом работы микросхемы является MPSSE (Multi-Protocol Synchronous Serial Engine). Компания FTDI предоставляет специальную библиотеку «Altera Programmer DLL» для работы с микросхемой FT2232C, которая использует режим MPSSE для реализации PS-режима конфигурирования FPGA. Данная библиотека содержит ряд функций, при помощи которых можно запрограммировать ПЛИС. Для конфигурирования FPGA через USB необходимо подключить микросхему FT2232C к ПЛИС. Существуют готовые программы-загрузчики с исходными кодами, выполненными в различных средах программирования (C++, Delphi, VB 6.0, VB.NET.).

Командный сигнал регулятора в цифровом коде, соответствующий (4), поступает в схему управления исполнительным механизмом, осуществляющим поворот затвора регулирующего органа исполнительного устройства, в качестве которого может использоваться асинхронный электродвигатель, служащий для преобразования подводимого к нему электрического сигнала в механическое перемещение вала. Цифровое управление исполнительным двигателем осуществляется наиболее простым в технической реализации методом фазового управления. Такая схема обладает по-

вышенной чувствительностью в области малых сигналов управления, а также хорошей линейностью механических характеристик в диапазоне регулирования. Реализация устройства управления исполнительным двигателем осуществима в ПЛИС [3].

Широкие функциональные возможности регулятора позволяют использовать его для управления как теплосодержанием, так и температурой, относительной влажностью, влагосодержанием воздуха, давлением, расходом, уровнем жидкости или любой другой физической величиной. При необходимости на входы регулятора могут быть подключены соответствующие датчики с унифицированными цифровыми выходами. В случае использования АСР для управления теплосодержанием или влагосодержанием его входы могут быть соединены с выходами цифрового устройства определения термодинамических параметров воздуха, выполненного также на ПЛИС [5]. Тем самым образуется комплект регулятора системы кондиционирования воздуха, состоящий из двух тесно сотрудничающих устройств. Параметры регулятора могут быть заданы вручную либо с помощью автоматической настройки (активной либо пассивной).

Список литературы

1. *Вычужанин В.В.* Управление комплексом СККВ – холодильная установка на основе многопроцессорной системы // Холодильная техника. 2004. № 12.
2. *Вычужанин В.В.* Развитие рынка и динамика применения ПЛИС // Электронные компоненты. 2004. № 12.
3. *Вычужанин В.В.* Устройство управления исполнительным двигателем на ПЛИС // Электронные компоненты, 2004, № 9.
4. *Вычужанин В.В.* Синтез автоматической системы регулирования для судовых кондиционеров воздуха // Вестник ОНМУ. 2005. № 15.
5. *Вычужанин В.В., Малюта С.В.* Цифровое устройство определения термодинамических параметров воздуха на ПЛИС фирмы Altera // Схемотехника. 2005. № 2.
6. *Вычужанин В.В., Медзеновский В.Б.* Исследование характеристик судового центрального кондиционера // Холодильная техника. 1984. № 3.
7. *Захаров Ю.В.* Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины. – СПб: Судостроение, 1994.
8. *Изерман Р.* Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984.
9. *Комолов Д. А., Мьяльк Р.А., Зобенко А.А.* Системы автоматизированного проектирования фирмы Altera MAX + plus II и Quartus II. – М.: ИП РадиоСофт, 2002.
10. *Суворова Е.А., Шейнин Ю.Е.* Проектирование цифровых систем на VHDL. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003.