

Проектирование микропроцессорной системы управления технологическим процессом

Содержание

1. [СИСТЕМА ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ МУФЕЛЬНОЙ ПЕЧЬЮ](#)
2. [ДАТЧИК](#)
3. [КЛАВИАТУРА](#)
4. [ЧАСЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ](#)
5. [ЖКИ ДИСПЛЕЙ](#)
6. [ЦАП](#)
7. [МИКРОКОНТРОЛЛЕР](#)
8. [РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОГРАММЫ](#)

1. СИСТЕМА ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ МУФЕЛЬНОЙ ПЕЧЬЮ

Назначение системы: разогрев в течение определенного времени образца, помещенного в камеру муфельной печи – рис. [X.XX1](#), выдержка образца при заданной температуре и интервале времени, а также постепенное снижение температуры до комнатной – также за определенное время.

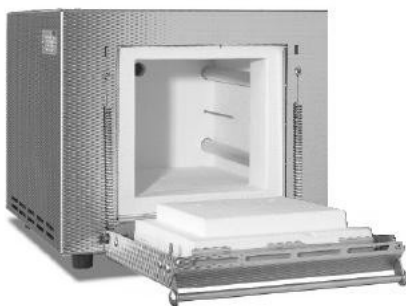


Рис. [X.XX1](#). Муфельная печь

Техническое задание на разработку системы программного управления муфельной печью.

1. Диапазон регулирования температуры $30 \div 1000$ °С.
2. Погрешность установки (поддержания) температуры ± 3 °С.
3. Программное задание времен: t_B, t_R, t_P, t_F - см. график на рис. [X.XX2](#).
4. Минимальное время между точками t_B и t_R – 30 мин.
5. Минимальное время между точками t_R и t_P – 0 мин.
6. Минимальное время между точками t_P и t_F – 30 мин.
7. Максимальное время между точками t_B и t_F – 8 часов.
8. Привязка времени t_B (времени включения) к заданному пользователем текущему времени.
9. Отображение заданной (текущей) и измеренной температур, а также прошедшего времени от момента включения.
10. Оповещение звуковым сигналом об окончании процесса.
11. Оповещение звуковым сигналом о нештатных ситуациях (пропадании сетевого напряжения).

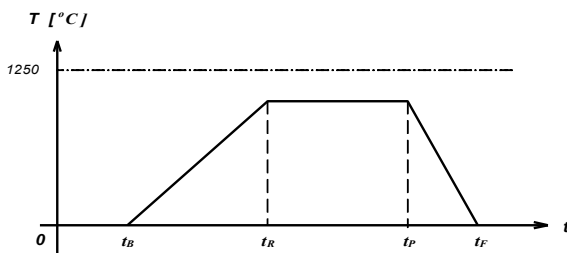


Рис. X.XX2. Программное управление муфельной печью

Работа над выполнением проекта может включать следующие этапы:

1. Анализ технического задания.
2. Разработка структурной схемы, аналитический расчет схемы, моделирование.
3. Разработка функциональной схемы.
4. Разработка принципиальной схемы (выбор и расчет элементов).
5. Разработка алгоритма программы.
6. Написание программы.
7. Отладка программы на объекте.

Из анализа технического задания следует, что необходимо разработать систему программного управления муфельной печью. Известно, что в общем случае САУ состоит из регулятора и объекта управления – рис. [X.XX3](#).

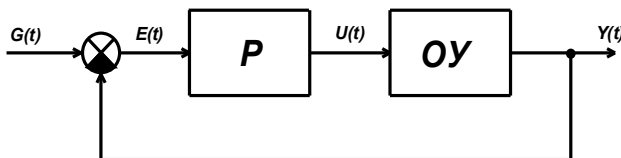


Рис. [X.XX3](#). Обобщенная структурная схема САУ

В проектируемой системе объектом управления (**ОУ**) является муфельная печь. Она представляет собой теплоизолированную камеру определенного объема с электронагревательным элементом мощностью до 2,5 кВт. Выходным параметром ОУ (управляемым параметром $Y(t)$) является температура в камере, а входным (управляющим воздействием $U(t)$) – напряжение, подаваемое на нагревательный элемент. Задающее воздействие $G(t)$ представляет собой заданную зависимость температуры от времени – рис. [X.XX2](#). Ошибка $E(t)$, представляющая собой разность между текущей заданной температурой и температурой измеренной в камере, подается на вход регулятора **P**. Регулятор, на основании полученной ошибки, должен формировать управляющее воздействие $U(t)$. В этой связи регулятор должен состоять как минимум из двух блоков – блока формирующего определен-

ный закон регулирования (например, ПИД) и второго блока – усилителя мощности.

С учетом вышеприведенного описания для определения параметров регулятора представим структурную схему системы управления печи в форме, удобной для нахождения ее передаточной функции – рис. X.XX4.

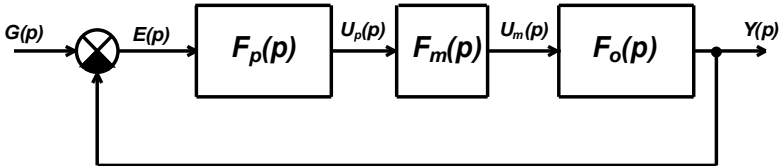


Рис. X.XX4. Структурная схема САУ муфельной печи

На рис. X.XX4 приняты следующие обозначения:

$G(p)$, $E(p)$, $U_p(p)$, $U_m(p)$, $Y(p)$ – задающее воздействие, ошибка, сигнал на выходе регулятора, сигнал на выходе усилителя мощности и управляемый параметр соответственно,

$F_p(p)$, $F_m(p)$, $F_o(p)$ – передаточные функции регулятора, усилителя мощности и объекта управления.

С учетом принятых обозначений находим передаточную функцию САУ муфельной печи

$$W(p) = \frac{Y(p)}{G(p)} = \frac{F_p(p)F_m(p)F_o(p)}{1 + F_p(p)F_m(p)F_o(p)}. \quad (X.1)$$

Синтез системы автоматического управления заключается в выборе параметров регулятора $F_p(p)$. Эта задача может быть решена только в том случае, если известны передаточные функции усилителя мощности $F_m(p)$ и объекта управления $F_o(p)$. Однако, они неизвестны. Для их нахождения необходимо составить математическое описание **этих** блоков. Ввиду высокой сложности объекта управления, такое описание сделать практически невозможно. В этой связи для нахождения коэффициентов передаточной функции муфельной печи воспользуемся ее разгонной характеристикой.

Наиболее простой способ получения разгонной характеристики – подача на нагревательный элемент печи напряжения сети и построение графика изменения температуры в камере от времени – рис. X.XX5.

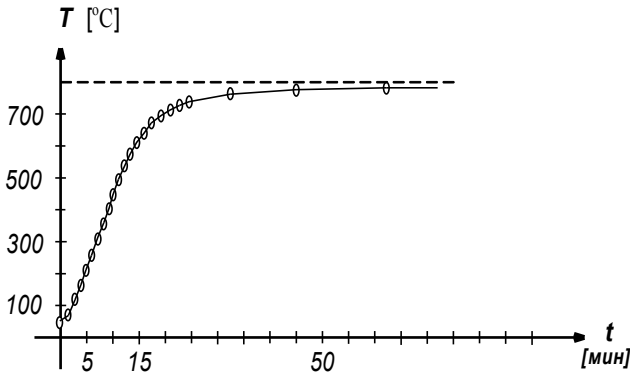


Рис. X.XX5. Разгонная характеристика муфельной печи

Приведенная на рисунке разгонная характеристика получена при подаче на нагревательный элемент 110 В.

Т.к. разгонная характеристика не содержит “выбросов” и носит аperiодический характер, то передаточная функция объекта управления может быть аппроксимирована звеном первого порядка с запаздыванием:

$$F_o(p) = K_0 \frac{\exp(-t/\tau)}{pT_0 + 1} . \quad (\text{X.2})$$

Время запаздывания τ и постоянная времени звена T_0 находятся по графику разгонной характеристики, а динамический коэффициент усиления K_0 объекта определяется как отношение приращения выходного сигнала к приращению входного в окрестности рабочей точки.

Для приведенной характеристики эти параметры равны: $\tau \approx 0,5$ [мин], $T_0 \approx 20$ [мин] и $K_0 \approx 7$ [°C/V]. Так как время запаздывания τ намного меньше постоянной времени T_0 , то им можно пренебречь. Тогда передаточная функция муфельной печи будет определяться выражением

$$F_o(p) = K_0 \frac{1}{pT_0 + 1}. \quad (\text{X.3})$$

В качестве усилителя мощности применим тиристорный регулятор напряжения. При изменении входного постоянного напряжения от 0 до 10 В, выходное действующее напряжение переменного тока регулятора изменяется в пределах от 0 до 220 В. Т.к. объект управления медленный, постоянными времени тиристорного регулятора можно пренебречь. Поэтому его передаточная функция определяется коэффициентом усиления пропорционального звена

$$F_m(p) = K_m, \quad (\text{X.4})$$

а его величина равна $K_m = 22$.

Подставляя выражение X.3 и X.4 в X.1, получаем:

$$W(p) = \frac{K_0 K_m F_p(p)}{1 + pT_0 + K_0 K_m F_p(p)}. \quad (\text{X.5})$$

Из литературных источников известно, что, если объект управления представляет собой аperiodическое звено, то лучшее качество регулирования достигается путем применения пропорционально-интегрального регулятора. Его структурная схема приведена на рис. X.XX6,

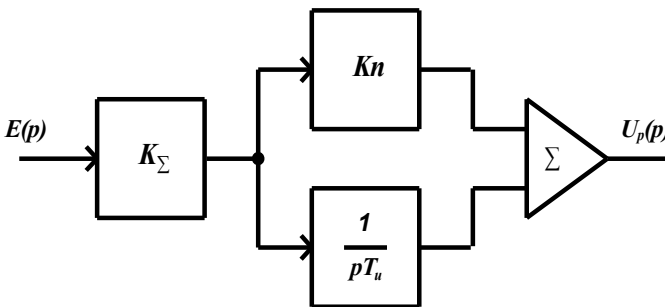


Рис. X.XX6. Структурная схема ПИ-регулятора

а передаточная функция определяется по формуле

$$F_p(p) = \frac{U_p(p)}{E(p)} = K_\Sigma \left[K_\Pi + \frac{1}{pT_{II}} \right]. \quad (\text{X.6})$$

Подставляя последнюю формулу в выражение X.5, находим иско-
мую передаточную функцию системы

$$W(p) = \frac{p \frac{K_0 K_m K_\Sigma K_\Pi}{T_0} + \frac{K_0 K_m K_\Sigma}{T_0 T_{II}}}{p^2 + p \frac{1 + K_0 K_m K_\Sigma K_\Pi}{T_0} + \frac{K_0 K_m K_\Sigma}{T_0 T_{II}}}. \quad (\text{X.7})$$

Известно, что качество управления определяется видом переходной характеристики системы, которая в свою очередь определяется по передаточной функции. Изменяя коэффициенты передаточной функции, можно изменять время переходного процесса и т.д., см. раздел X.X. В передаточной функции X.7 коэффициенты K_0 , K_m и T_0 являются постоянными и неизменными, а коэффициенты K_Σ , K_Π и T_{II} , определяемые ПИ-регулятором, могут варьироваться, поэтому путем их расчета (выбора их значений) и осуществляется настройка работы всей системы.

Знаменатель передаточной функции системы второго порядка в общем виде определяется выражением

$$p^2 + pd_p \omega_p + \omega_p^2, \quad (\text{X.8})$$

где ω_p - частота полюса,

d_p - затухание полюса.

Сравнивая коэффициенты при одинаковых степенях p выражений X.7 и X.8, находим

$$\omega_p = \sqrt{\frac{K_0 K_m K_\Sigma}{T_0 T_{II}}}, \quad (\text{X.9})$$

$$d_p = \sqrt{\frac{T_{II}}{T_0}} \frac{1 + K_0 K_m K_\Sigma K_{II}}{\sqrt{K_0 K_m K_\Sigma}}. \quad (\text{X.10})$$

Известно, что частота полюса определяет время переходного процесса, а затухание – перерегулирование (выброс на переходной характеристике). Изменяя параметры регулятора, можно получить желаемый вид переходной характеристики системы.

Качественную оценку работы проектируемой системы можно получить, выполнив ее моделирование с помощью одной из программ, например Matlab, OrCAD, MicroCap, Multisim и др.

Так как схема ПИД регулятора, реализованная на аналоговых элементах, содержит небольшое количество узлов, воспользуемся DE-MO-версией программы Micro-Cap9, позволяющей выполнять моделирование схем, содержащих до нескольких десятков узлов, и доступной для скачивания из интернета по адресу: www.spectrum-soft.com.

Micro-Cap9 позволяет выполнить моделирование системы непосредственно по выражению передаточной функции (X.7). Для этой цели в программе есть несколько типов линейных управляемых источников, задаваемых преобразованиями Лапласа и Z-преобразованиями. Например, *LFVofV* означает задаваемый формулой передаточной функции источник напряжения, управляемый напряжением в *S*-области, а *ZVofV* - аналогичный источник, задаваемый формулой передаточной функции в *Z*-области. Однако, более наглядный результат можно получить, выполнив моделирование схемы системы - рис. X.XX7. В этой схеме объект управления *OU* выполнен в виде источника напряжения, управляемого напряжением (LF) с передаточной функцией, определяемой выражением (X.3), а регулятор и дискриминатор выполнены на операционных усилителях, резисторах и конденсаторах, причем пропорциональная часть регулятора *П* выполнена на операционном усилителе X2 и резисторах R3, R4, интегральная часть *И* регулятора – на операционном усилителе X3, конденсаторе C1 и резисторе R5, сумматор регулятора выполнен на операционном усилителе X4 и резисторах R6, R7, R8, а дискриминатор (см. схему на рис.

X.XX3) - на двух операционных усилителях X5, X7 и резисторах R9, R10, R14, R15, R16.

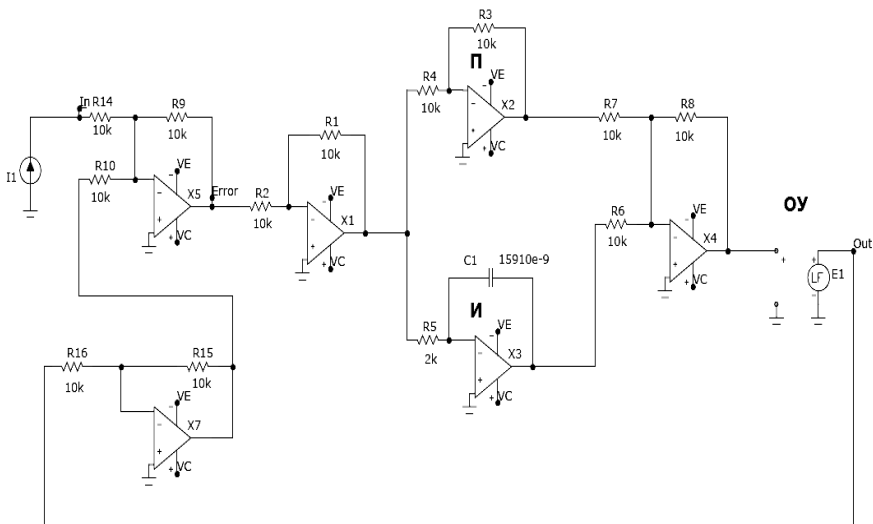


Рис. **X.XX7**. Схема моделирования системы с аналоговым регулятором

В соответствии с принятыми на схеме обозначениями, коэффициенты передаточной функции регулятора определяются по формулам:

$$K_{\Sigma} = \frac{R_1}{R_2}, \quad (\text{X.11})$$

$$K_{\Pi} = \frac{R_3}{R_4}, \quad (\text{X.12})$$

$$T_{\Pi} = R_5 C_1. \quad (\text{X.13})$$

На рисунках **X.XX8 - X.XX10** приведены нормированные графики, иллюстрирующие характер изменения переходной характеристики системы, при изменении коэффициентов передаточной функции регулятора K_{Σ} , K_{Π} и T_{Π} соответственно. На всех графиках для сравнения

приведена переходная характеристика объекта управления, отмеченная – **оу**, без регулятора.

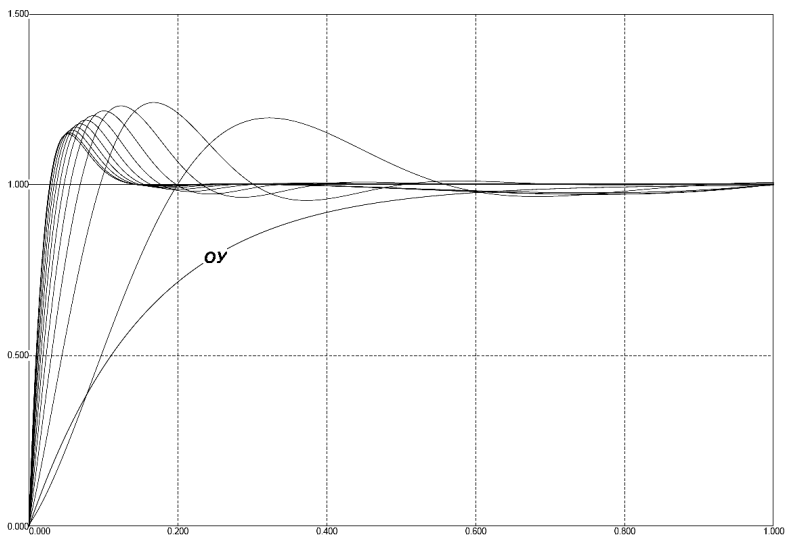


Рис. X.XX8. Переходные характеристики системы при изменении K_{Σ}

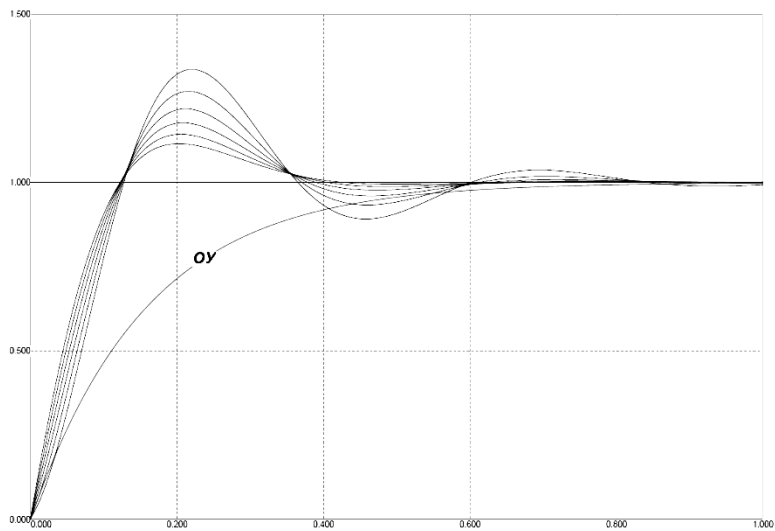


Рис. X.XX9. Переходные характеристики системы при изменении K_{II}

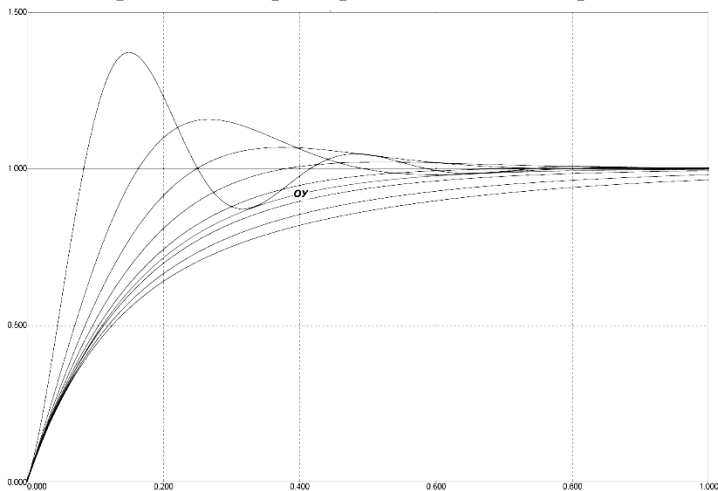


Рис. X.XX10. Переходные характеристики системы при изменении T_{II}

При выборе $T_0 = T_{II}$, $K_{II} = 1$ и изменении K_{Σ} , получается семейство переходных характеристик системы без перерегулирования - рис. X.XX11.

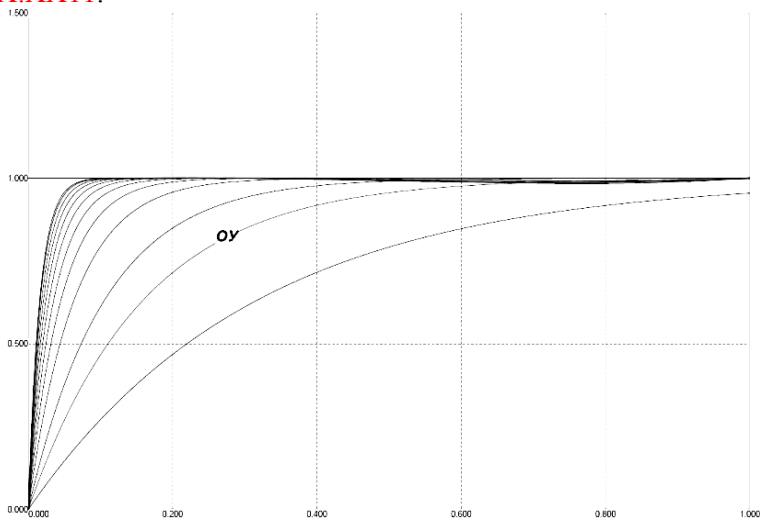


Рис. X.XX11. Семейство переходных характеристик без перерегулирования

В зависимости от функций, возлагаемых на микроконтроллер, можно предложить, по крайней мере, две функциональные схемы для реализации системы программного управления муфельной печью – рис. X.XX12 и рис. X.XX13.

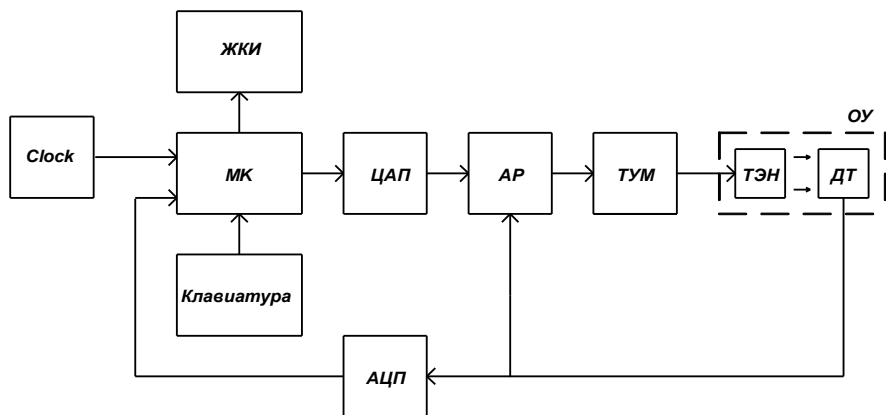


Рис. X.XX12. Функциональная схема системы с аналоговым регулятором

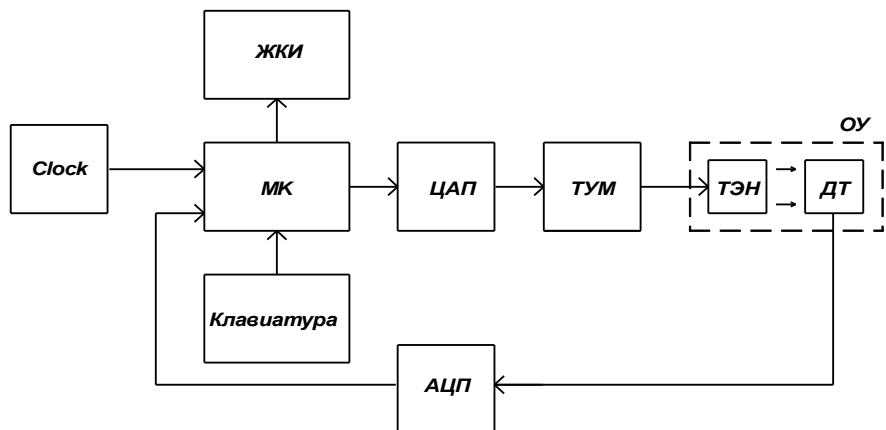


Рис. X.XX13. Функциональная схема системы с цифровым регулятором

На вышеприведенных функциональных схемах приняты следующие обозначения: **ЖКИ** – жидкокристаллический индикатор, **МК** – микроконтроллер, **ТУМ** – тиристорный усилитель мощности, **ТЭН** – теплоэлектронагреватель муфельной печи, **ДТ** – датчик температуры, **АР** – аналоговый регулятор, **АЦП** и **ЦАП** – аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи соответственно, **Clock** – часы реального времени.

В схеме, изображенной на рис. [X.XX12](#), на микроконтроллер возлагаются “сервисные функции”: отображение вводимых данных с клавиатуры, времени, температуры в печи, а также формирование “задающего воздействия” в соответствии с графиком (рис. [X.XX2](#)). Регулятор в этой схеме реализуется на элементах аналоговой техники.

В схеме, приведенной на рис. [X.XX13](#), в отличие от предыдущей схемы, регулятор реализуется программно на микроконтроллере.

Благодаря тому, что постоянные времени объекта управления большие, затруднений в реализации регулятора в цифровом виде на микроконтроллере не должно возникнуть. В этой связи целесообразно остановить выбор реализации системы управления на основе схемы с цифровым регулятором. Помимо простоты аппаратной реализации эта схема обладает еще одним преимуществом – легкостью изменения параметров коэффициентов регулятора за счет их программного управления (изменения).

Программная реализация цифрового регулятора выполняется по разностному уравнению, которое устанавливает взаимосвязь между его входной и выходной цифровыми последовательностями данных. Это уравнение может быть найдено путем преобразования передаточной функции непрерывного регулятора ([X.6](#)).

Применяя одно из известных преобразований переменных p в z (например, Эйлера) к выражению ([X.6](#)), находим дискретную передаточную функцию регулятора

$$F_p(z) = \frac{U_p(z)}{E(z)} = K_\Sigma \left[K_n + \frac{T_s}{(1 - z^{-1})T_H} \right], \quad (\text{X.14})$$

из которой получаем искомое разностное уравнение

$$U_p(nT_s) = K_{\Sigma} \left[K_{\Pi} + \frac{T_s}{T_{II}} \right] E(nT_s) + U_p((n-1)T_s), \quad (\text{X.15})$$

где T_s - интервал дискретизации сигнала,

n – порядковый номер отсчета сигнала,

$E(nT_s)$ - цифровая последовательность отсчетов входного сигнала,

$U_p(nT_s)$ - цифровая последовательность отсчетов выходного сигнала.

Моделирование системы с цифровым регулятором может быть выполнено, например, по схеме, приведенной на рис. [X.XX14](#). В этой схеме цифровой **ПИ** регулятор выполнен в виде источника напряжения, управляемого напряжением (Z) с передаточной функцией, определяемой выражением (X.14). При выполнении условия $T_s \ll T_0$, переходные характеристики системы с цифровым регулятором повторяют переходные характеристики системы с аналоговым регулятором – рис. [X.XX14](#).

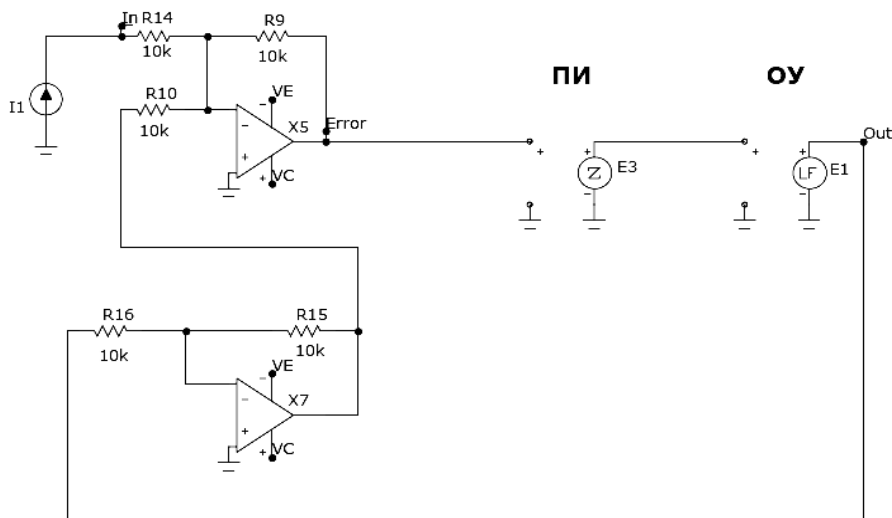


Рис. [X.XX14](#). Схема моделирования системы с цифровым регулятором

Разработка принципиальной схемы заключается в разработке схмотехнических решений отдельных блоков функциональной схемы, а также в выборе или поиске готовых известных схмотехнических решений и согласовании функциональных блоков по параметрам сигналов.

2. ДАТЧИК

Основным параметром для выбора типа датчика температуры является диапазон измеряемых температур. Так как он достаточно велик (от 0 до 1000 °С), то в качестве чувствительного элемента наилучшим образом подходит термопара. Однако выходное напряжение термопары слишком мало чтобы АЦП смог обеспечить преобразование температуры с достаточной точностью. В этой связи между термопарой и входом АЦП необходимо установить прецизионный усилитель постоянного напряжения. Для повышения точности преобразования необходимо также каким-либо образом обеспечить компенсацию холодного спая термопары – рис. X.XX15.

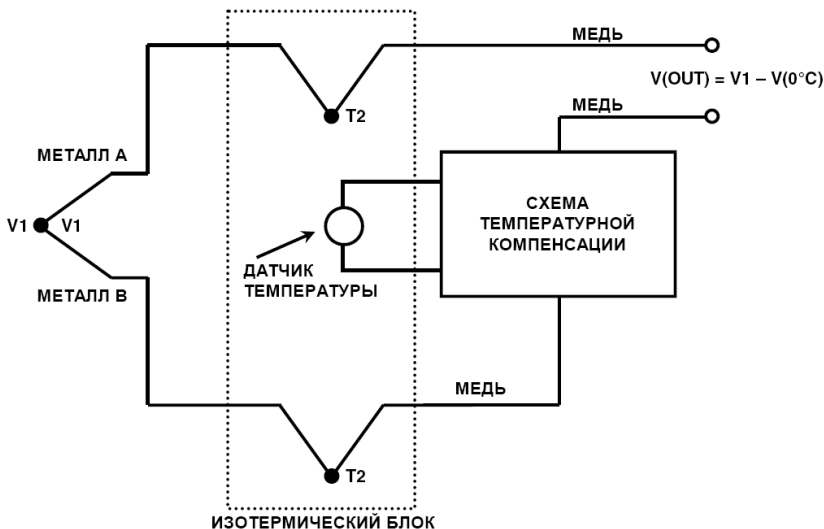


Рис. X.XX15. Установка проводников термопары и датчика температуры в изотермическом блоке

Реализовать такую схему компенсации можно на дискретных элементах – рис. X.XX16 (схема взята из Datasheets на микросхему [TM-P35](#))

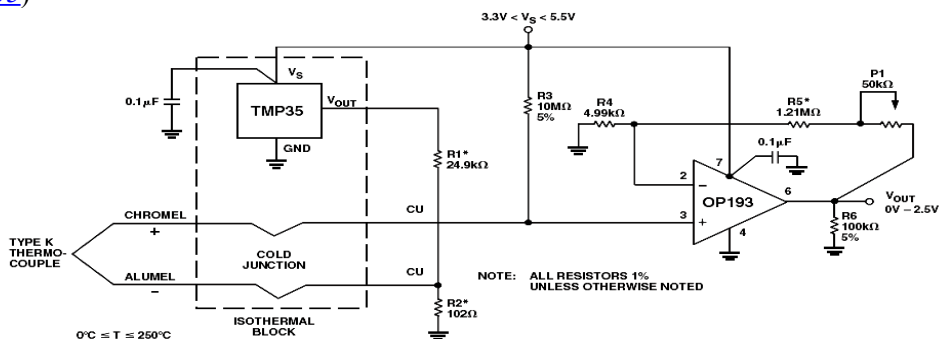


Рис. X.XX16. Схема компенсации холодного спая на дискретных элементах

В результате поиска электронных компонентов для решения этой задачи находим готовое решение в виде интегральной микросхемы [AD494](#) (или [AD595](#)) фирмы [Analog Devise](#). Схема подключения этой микросхемы, приведена на рис. [X.XX17](#).

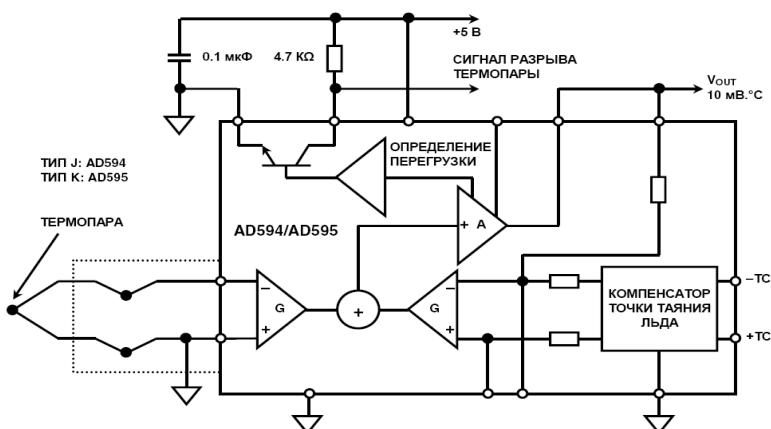


Рис. X.XX17. Монолитные усилители термопар [AD494/AD495](#)

с компенсацией холодного спая

Однако ни одно из описанных выше устройств не компенсирует нелинейности термопары, они обеспечивают лишь нормирование сигнала и его усиление по напряжению. АЦП с высоким разрешением, например, АЦП семейства AD77XX, благодаря встроенному программируемому усилителю, можно использовать для непосредственного квантования сигналов с термопар. Для квантования напряжения с термопары и с выхода температурного датчика холодного спая используются два мультиплексных входа АЦП, что позволяет микроконтроллеру выполнять линейризацию функции преобразования термопары – рис. X.XX18.

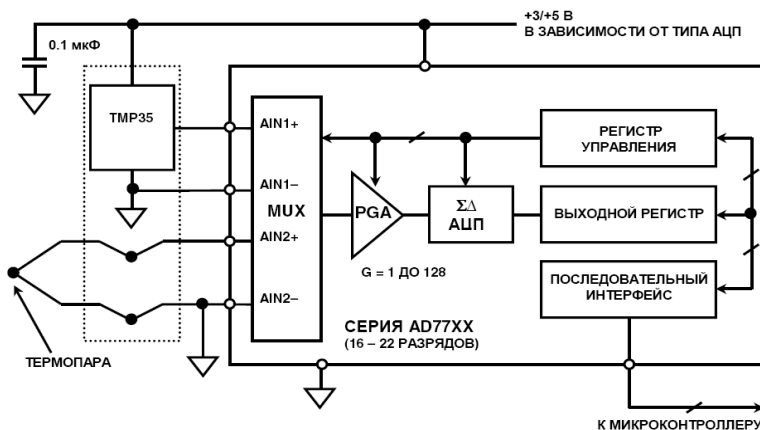


Рис. X.XX18. АЦП семейства AD77XX, используемый совместно с температурным датчиком [TMP35](#) для компенсации температуры холодного спая

В зависимости от конкретного типа АЦП AD77XX разрешение АЦП составляет от 16 до 24 разрядов, а коэффициент усиления входного усилителя (PGA) программируется от 1 до 128.

Интегральный датчик температуры [TMP35](#) позволяет измерять температуру в диапазоне от 10 до 125 °С с абсолютной погрешностью

± 2 °C и с относительной ± 0.5 °C. Микросхема изготавливается в трех вариантах корпусов TO-92, SOT-23 и SOIC. Питание осуществляется от однополярного источника напряжения 2.7 - 5.5 В. Выходным сигналом датчика является напряжение, а крутизна преобразования составляет 10 мВ/°C – см. рис. X.XX19.

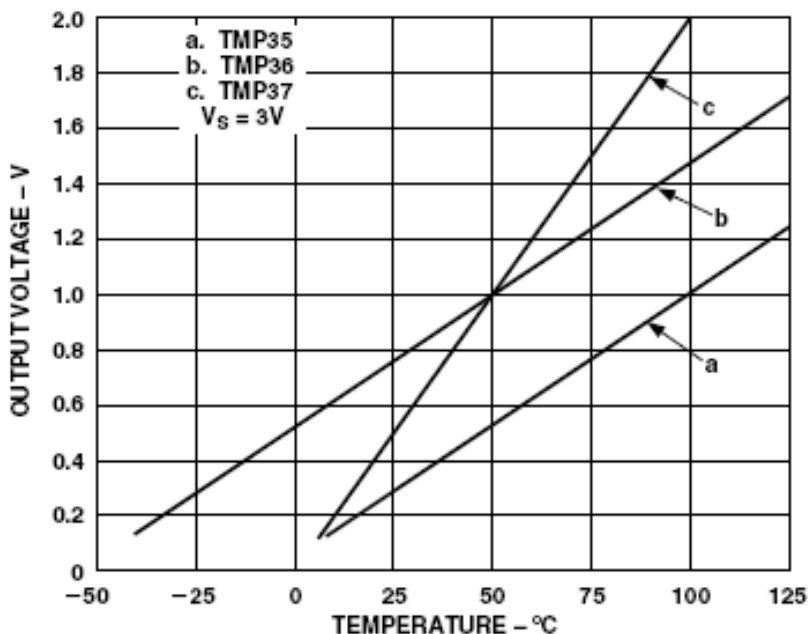


Рис. X.XX19. Зависимость выходного напряжения от температуры [TMP35 - TMP37](#)

Ранее было отмечено, что в качестве АЦП может быть применена одна из микросхем серии AD77XX. Рассмотрим более подробно, например, [AD7714](#). Структурная схема этого АЦП и схема его подключения к термопаре, рекомендуемая фирмой изготовителем, приведена на рис. X.XX20.

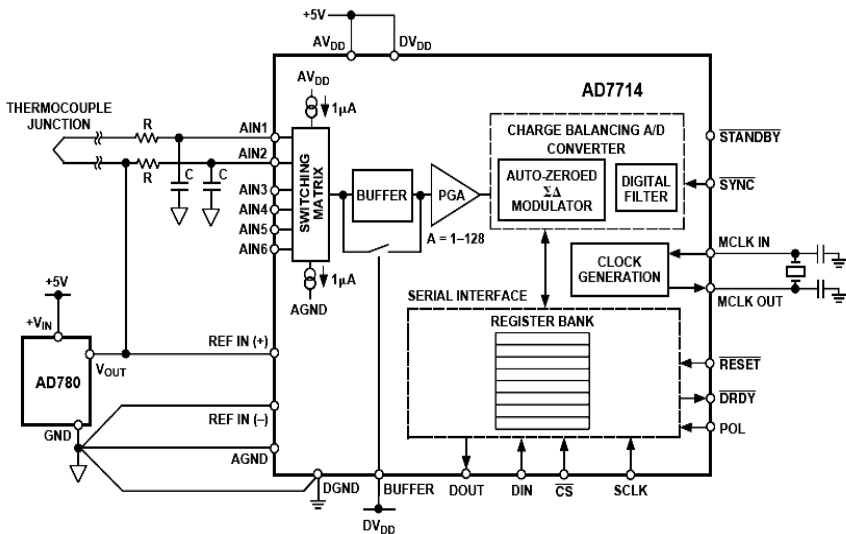


Рис. X.XX20. Измерение температуры с помощью термопары и АЦП [AD7714](#)

Подключив ко второму входному каналу AD7714 датчик TMP35, получим схему измерения с температурной компенсацией.

Связь микроконтроллера с AD7714 осуществляется с помощью SPI-интерфейса (выводы DOUT, DIN, SCLK). Этот интерфейс используется как для считывания результатов преобразования АЦП, так и для программирования коэффициента усиления программируемого усилителя - PGA, а также выбора одного из трех дифференциальных входных каналов преобразования с помощью аналогового коммутатора сигналов – SWITCHING MATRIX. Описание протокола обмена данными [AD7714](#) по SPI-интерфейсу занимает несколько страниц, поэтому здесь не приводится. Однако он будет востребован при программировании микроконтроллера. Его можно найти в интернете по ссылке: http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/AD7714.pdf.

В качестве источника опорного напряжения АЦП рекомендуется использовать маломощный прецизионный источник напряжения 2.5 В, выполненный на основе интегральной микросхемы AD870. Отличительной особенностью этого источника является малый темпера-

турный дрейф выходного напряжения (Ultralow drift), который не превышает 3 ppm/°C .

3. **КЛАВИАТУРА**

Опыт проектирования подобных устройств показывает, что для программирования режима работы прибора достаточно шести кнопок. Две из них используются для перемещения курсора вверх - вниз по экрану дисплея (↑, ↓), еще две – для изменения данных в выбранной позиции курсора (▲, ▼), и две последних – для пролистывания выводимых страниц (←, →). Для управления работой печи достаточно двух кнопок – “Пуск” и “Стоп”. При нажатии кнопки “Пуск” должна разрешаться работа прибора, а кнопки “Стоп” – осуществляться аварийное выключение печи при нештатных ситуациях.

4. **ЧАСЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Для решения задачи построения часов реального времени в разрабатываемой системе можно предложить два пути.

Первый путь это программная реализация часов в микроконтроллере. Такие часы при выключении питания микроконтроллера будут сбрасываться. Решением проблемы может быть использование дополнительного источника энергии (например, батареи) для питания микроконтроллера на время отключения сетевого напряжения. Однако, из-за повышенного энергопотребления микроконтроллером, продолжительную автономную работу часов обеспечить не удастся.

Второй путь - применение специализированной микросхемы часов реального времени (например, DS1305, DS1307, DS1372, [M41T00](#) и др.). Рассмотрим более подробно микросхему [DS1307](#) фирмы Dallas Semiconductor (www.maxim-ic.com). Ее функциональная схема приведена на рис. [X.XX21](#).

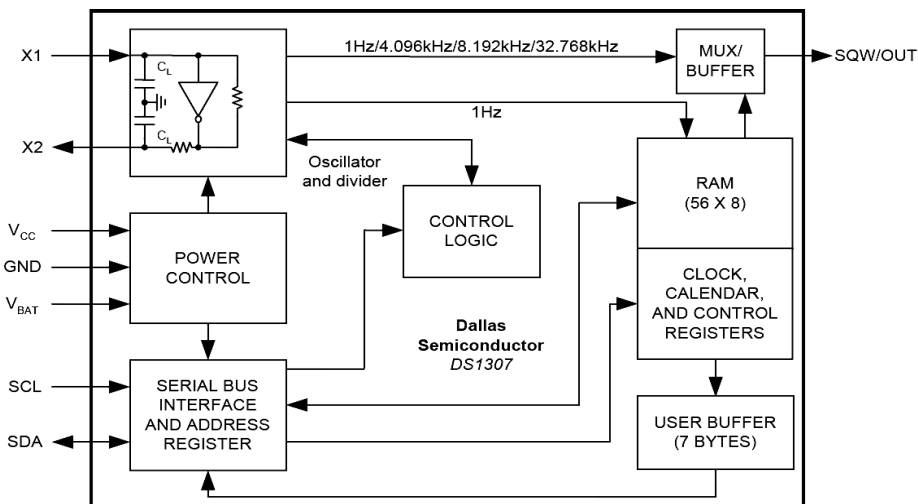


Рис. X.XX21. Функциональная схема микросхемы часов [DS1307](#)

DS1307 представляет собой часы реального времени с интерфейсом I²C. Помимо часов, эта микросхема в своем составе имеет полный календарь и 56 байт статического ОЗУ. Часы генерируют следующую информацию – секунды, минуты, часы, день недели, число, месяц и год. Автоматически вносится поправка для месяцев с различным числом дней, включая поправку для високосного года. DS1307 имеет встроенную цепь контроля питания, которая автоматически переключает ее на питание от батареи при пропадании внешнего напряжения. Литиевая батарея в данном устройстве работоспособна в течение нескольких лет.

Микросхема [DS1307](#) изготавливается в пластмассовых восьмивыводных DIP и SO корпусах. Расположение выводов показано на рис. X.XX22.

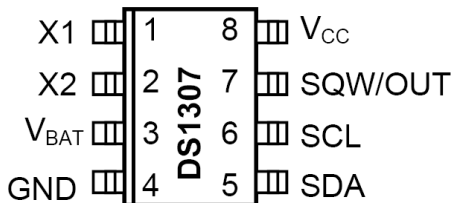


Рис. X.XX22. Расположение выводов микросхемы [DS1307](#)

Вывод V_{cc} служит для подключения к источнику питания +5 В, GND – к общему проводу, V_{BAT} – для подключения стандартной литиевой батареи. Вывод SCL предназначен для передачи импульсов синхронизации шины I²C, а SDA – для передачи данных. Выводы X1 и X2 служат для подключения стандартного часового резонатора на частоту 32768 Гц. Еще один вывод микросхемы SQW/OUT является выходом генератора тактовых импульсов с предварительным коэффициентом деления. Частота следования импульсов на этом выводе может быть равной 1, 4096, 8192 или 32768 Гц. Выбор частоты осуществляется путем задания состояния двух битов (RS1 и RS0 – см. табл. XX.1.) в регистре управления – CONTROL REGISTR. Типичная схема подключения DS1307 к микроконтроллеру, рекомендуемая изготовителем, приведена на рис. X.XX23.

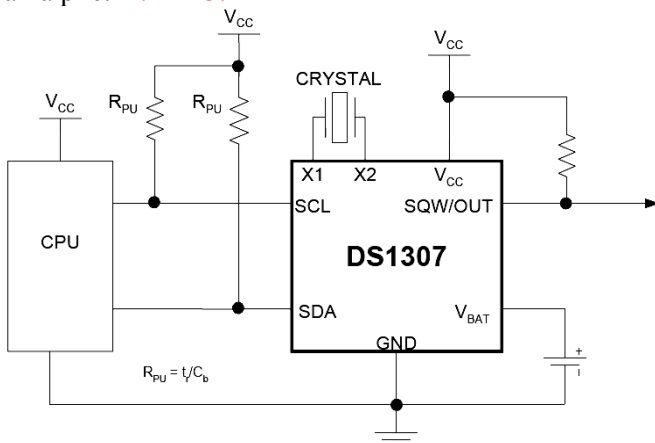


Рис. X.XX23. Схема подключения [DS1307](#) к микроконтроллеру

Микросхема часов работает как ведомое устройство по шине I²C. Когда напряжение питания падает ниже $1,25 \cdot U_{\text{BAT}}$, устройство прекращает связь и сбрасывает адресный счетчик. В это время оно не реагирует на входные сигналы, что предотвращает запись ошибочной информации.

Протокол записи данных в микросхему часов по шине I²C приведен на рис. X.XX24, а на рис. X.XX25 – протокол чтения данных из микросхемы.

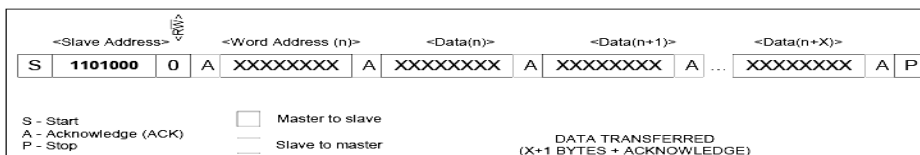


Рис. X.XX24. Запись данных в DS1307

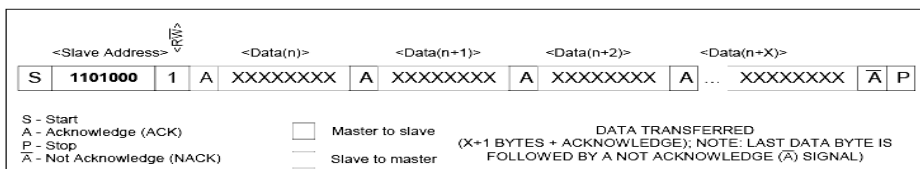


Рис. X.XX25. Чтение данных из DS1307

Непосредственно для счетчиков часов отведены регистры с адресами 00h – 06h, а для статического ОЗУ регистры с адресами 08h – 3Fh – см. табл. XX.1. По адресу 07h расположен регистр управления. Некоторые регистры, помимо собственно значений счетчиков часов или календаря, содержат дополнительные управляющие биты или флаги состояния (более подробно смотрите полное описание на микросхему).

Табл. XX.1

ADDRESS	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0	FUNCTION	RANGE
00H	CH	10 Seconds			Seconds				Seconds	00–59
01H	0	10 Minutes			Minutes				Minutes	00–59
02H	0	12	10 Hour	10 Hour	Hours				Hours	1–12 +AM/PM 00–23
		24	PM/ AM							
03H	0	0	0	0	DAY				Day	01–07
04H	0	0	10 Date		Date				Date	01–31
05H	0	0	0	10 Month	Month				Month	01–12
06H	10 Year				Year				Year	00–99
07H	OUT	0	0	SQWE	0	0	RS1	RS0	Control	—
08H–3FH									RAM 56 x 8	00H–FFH

Определенное удобство при программировании микроконтроллера вызывает тот факт, что значение секунд, минут и т.д. представлены в двоично-десятичном формате, благодаря чему отсутствует необходимость в дешифрации принимаемых от микросхемы [DS1307](#) данных.

5. ЖКИ ДИСПЛЕЙ

Для выбора типа LCD-дисплея необходимо определить объем выводимой информации.

Так как этот объем достаточно большой, поместить всю информацию на экране одного символьного ЖКИ дисплея не представляется возможным. В этой связи вывод информации будет осуществляться постранично.

На первой странице, с точки зрения удобства пользователя, целесообразно отображать текущую информацию о ходе процесса:

- текущее время – (*год.месяц.день недели.число часы:минуты:секунды*),
- расчетное значение температуры на данный момент времени - *TC* (в соответствии с графиком – рис. [X.XX2](#)),
- измеренное значение температуры на данный момент времени - *TM*,
- время, соответствующее началу процесса - *START*,
- время, пройденное с момента начала процесса - *ELAPSED*.

До начала процесса, расчетное значение температуры и время, пройденное с момента начала процесса, предполагается выводить в формате “xx”, т.е. не определено – рис. [X.XX26](#).

2	0	0	8	.	0	7	.	0	2	.	0	1					1	2	:	4	5	:	1	4	
T	C	=	x	x	x	x	°	C									T	M	=	0	0	2	5	°	C
S	T	A	R	T			-	1	4	:	0	0	:	0	0										
E	L	A	P	S	E	D	-	x	x	:	x	x	:	x	x										

Рис. X.XX26. Вид ЖКИ экрана (первой страницы).

На второй странице отображение данных для программирования режима работы “*TIME & TEMPERATURE SETUP*”:

- t_B , - см. рис. X.XX2,
- t_R , - см. рис. X.XX2,
- t_P , - см. рис. X.XX2,
- t_F , - см. рис. X.XX2,
- температура – см. рис. X.XX27.

T	I	M	E		&		T	E	M	P	E	R	A	T	U	R	E		S	E	T	U	P	
T	B	=	0	8	:	3	0	:	0	0			T	R	=	1	0	:	2	0	:	0	0	
T	P	=	1	0	:	0	5	:	0	0			T	F	=	1	1	:	5	5	:	0	0	
T	E	M	P	E	R	A	T	U	R	E	=	0	7	0	7	°	C							

Рис. X.XX27. Вид ЖКИ экрана (второй страницы).

На третьей странице отображение информации для установки часов “*DATE & TIME SETUP*”:

:

- год,
- месяц,
- число,
- день недели
- часы,
- минуты,
- секунды.
- команда установки часов (*Save*) – см. рис. X.XX28.

			D	A	T	E		&		T	I	M	E		S	E	T	U	P				
Y	e	a	r		-	0	8		D	a	t	e		-	0	1		S	e	c	-	1	4
M	o	n	t	h	-	0	7		H	o	u	r	h	-	0	8							
D	a	y			-	0	2		M	i	n	u	t	-	3	0				S	a	v	e

Рис. X.XX28. Вид ЖКИ экрана (третьей страницы).

На четвертой странице отображение коэффициентов ПИД-регулятора “PID CONROL SETUP”:

- P – коэффициент пропорциональной части,
- I – коэффициент интегральной части,
- D – коэффициент дифференциальной части - см. рис. X.XX29.

			P	I	D		C	O	N	T	R	O	L		S	E	T	U	P				
									P	=	1	0	0	%									
									I	=		5	0	%									
									D	=			0	%									

Рис. X.XX29. Вид ЖКИ экрана (четвертой страницы).

Приведенные рисунки выводимых экранов позволяют сделать вывод о целесообразности применения четырех строчечного сорока символьного ЖКИ дисплея, например FDCC4004A-FLYYBW-65XR фирмы [Fordata Electronic](#) или [WH4004A-GMB -JS](#) фирмы Winstar – рис. X.XX30.



Рис. X.XX30. Символьный LCD-дисплей [WH4004A](#) фирмы Winstar

В дисплее WH4004A применен контроллер [KS0066](#) фирмы Samsung. Подключение дисплея к микроконтроллеру осуществляется к его цифровым портам ввода-вывода (см. главу XXX). Назначение выводов разъема дисплея приведено в табл. XX.2.

Табл. XX.2

№ вывода	Обозначение	Назначение
1	DB7	Старший бит шины данных
2	DB6	Бит 6 шины данных
3	DB5	Бит 5 шины данных
4	DB4	Бит 4 шины данных
5	DB3	Бит 3 шины данных
6	DB2	Бит 2 шины данных
7	DB1	Бит 1 шины данных
8	DB0	Младший бит шины данных
9	E1	Вход разрешения первого контроллера H→L
10	R/W	H/L Чтение/Запись
11	RS	Выбор регистра
12	Vo	Вход напряжения регулировки контрастности
13	Vss	GND
14	Vdd	+ 5 В
15	E2	Вход разрешения второго контроллера H→L
16	NC/Vee	Выход отрицательного напряжения
17	A	Вывод анода светодиода подсветки
18	K	Вывод катода светодиода подсветки - GND

Отличительной особенностью дисплея WH4004A, от рассмотренного ранее [WH2002A](#) в главе [XXX](#), является наличие двух дополнительных выводов на его разъеме с номерами 9 и 15, разрешающих работу первого или второго контроллера дисплея.

6. ЦАП

С целью упрощения схемы, а также трассировки печатной платы, желательно применить ЦАП с интерфейсом SPI или I²C. Или подобрать микроконтроллер со встроенным ЦАП. Так, например, фирма Atmel приступает к серийному производству новой серии 8-ми разрядных микроконтроллеров Xmega, содержащих встроенные 12-ти разрядные АЦП и ЦАП. Однако, в настоящее время доступны только опытные образцы этих микроконтроллеров, поэтому воспользуемся микросхемой ЦАП с интерфейсом I²C. Здесь следует заметить, что применение ЦАП с интерфейсом I²C позволяет снизить требования к микроконтроллеру по числу цифровых выходов. Перечень микросхем ЦАП с интерфейсом I²C, изготавливаемых различными фирмами, достаточно велик, поэтому с выбором типа ЦАП не возникает проблем. Например, фирма Texas Instruments выпускает интегральные микросхемы 10-ти разрядного ЦАП [DAC6571](#), 16-ти разрядного ЦАП [DAC8571](#) и др.

Микросхема ЦАП [DAC6571](#) имеет следующие параметры: время установления выходного сигнала – 10 мкс, потребление – 0,7 мВт, напряжение питания 5 В. Изготавливается DAC6571 в корпусе SOP-6, а его функциональная схема приведена на рис. [X.XX31](#). Выходной буферный усилитель микросхемы имеет режим “Rail-to-Rail”, поэтому напряжение на его выходе может изменяться от 0 до напряжения питания.

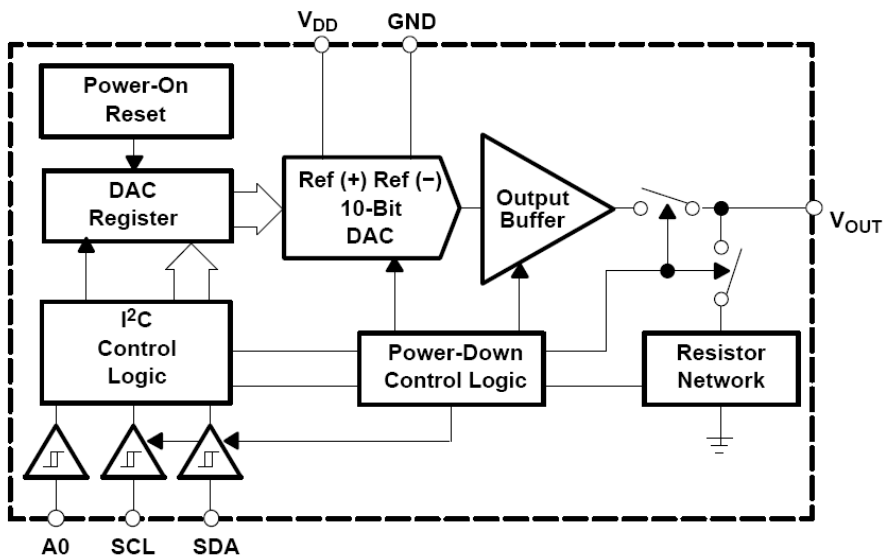


Рис. X.XX31. Функциональная схема ЦАП [DAC6571](#)

В качестве источника питания микросхемы ЦАП и одновременно источника опорного напряжения изготовителем рекомендуется использовать микросхему REF02 со схемой включения, приведенной на рис. X.XX32.

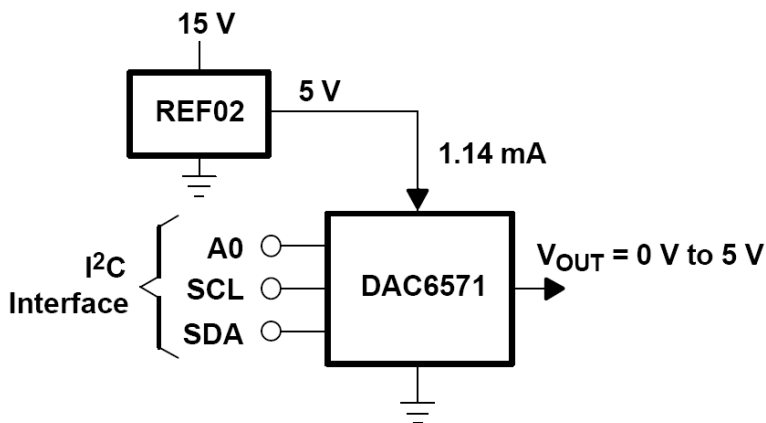


Рис. X.XX32. Типичная схема включения ЦАП [DAC6571](#)

Протокол передаваемых данных по шине I²C и адрес микросхемы DAC6571, приведены на рис. X.XX33.

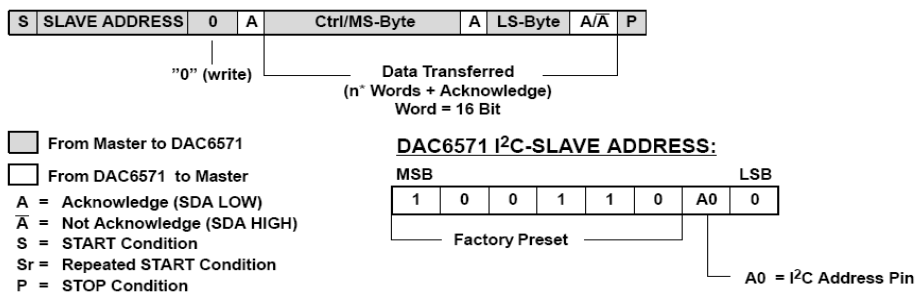


Рис. X.XX33. Протокол передаваемых данных по шине I²C с ЦАП [DAC6571](#)

Состояние бита адреса **A0** определяется подключением соответствующего вывода микросхемы (см. рис. X.XX32) к источнику питания или к общему проводу. Более подробное описание DAC6571 находится по адресу: <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/dac6571.html>.

7. МИКРОКОНТРОЛЛЕР

На основе анализа функциональной схемы, а также в результате выбора конкретных устройств (клавиатуры, АЦП, часов реального времени и т.д.), подключаемых к микроконтроллеру, можно сформулировать требования к его интерфейсам. Итак, микроконтроллер должен содержать:

- SPI-интерфейс - для подключения АЦП [AD7714](#),
- I²C-интерфейс - для подключения RTC DS1307 и ЦАП [DAC6571](#),
- 12 цифровых линий ввода-вывода общего назначения - для подключения ЖКИ дисплея WH4004A,
- 8 цифровых входов с возможностью вызова прерывания при изменении состояния на этих входах - для подключения клавиатуры (8-ми кнопок).

Вышеперечисленным требованиям удовлетворяет, например, микроконтроллер [ATmega16](#) фирмы [Atmel](#) – рис. X.XX34.

(XCK/T0) PB0	□ 1	40	□ PA0 (ADC0)
(T1) PB1	□ 2	39	□ PA1 (ADC1)
(INT2/AIN0) PB2	□ 3	38	□ PA2 (ADC2)
(OC0/AIN1) PB3	□ 4	37	□ PA3 (ADC3)
(\overline{SS}) PB4	□ 5	36	□ PA4 (ADC4)
(MOSI) PB5	□ 6	35	□ PA5 (ADC5)
(MISO) PB6	□ 7	34	□ PA6 (ADC6)
(SCK) PB7	□ 8	33	□ PA7 (ADC7)
\overline{RESET}	□ 9	32	□ AREF
VCC	□ 10	31	□ GND
GND	□ 11	30	□ AVCC
XTAL2	□ 12	29	□ PC7 (TOSC2)
XTAL1	□ 13	28	□ PC6 (TOSC1)
(RXD) PD0	□ 14	27	□ PC5 (TDI)
(TXD) PD1	□ 15	26	□ PC4 (TDO)
(INT0) PD2	□ 16	25	□ PC3 (TMS)
(INT1) PD3	□ 17	24	□ PC2 (TCK)
(OC1B) PD4	□ 18	23	□ PC1 (SDA)
(OC1A) PD5	□ 19	22	□ PC0 (SCL)
(ICP) PD6	□ 20	21	□ PD7 (OC2)

Рис. X.XX34. Микроконтроллер [ATmega16](#)

Использование портов микроконтроллера может быть таким: все выводы порта *A*, а также выводы *PB0-PB3* порта *B* - для подключения ЖКИ, выводы *SDA* и *SCL* порта *C* – интерфейс I²C, выводы *MOSI*, *MISO* и *SCK* – интерфейс SPI, а все выводы порта *D* – для подключения клавиатуры.

При нажатии любой из 8-ми кнопок клавиатуры должно вызываться внешнее прерывание, однако в микроконтроллере имеется всего два таких прерывания - *INT0* и *INT1*. В качестве решения этой проблемы можно предложить схему, выполненную на диодах и подключаемую к порту *D* – рис. X.XX35.

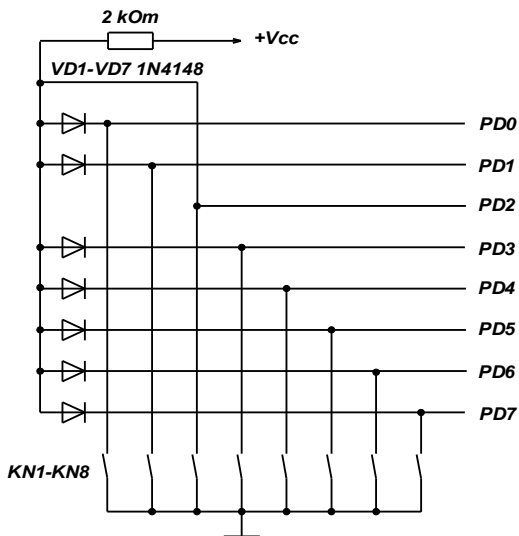


Рис. X.XX35. Схема подключения клавиатуры к микроконтроллеру [ATmega16](#)

Работает схема следующим образом. При включении микроконтроллера порт **D** настраивается как цифровой вход и включается “подтяжка резисторов”. В результате на все входы порта поступают сигналы с уровнем равным логической 1. При нажатии любой из кнопок KN1-KN8 на входе порта PD2 (INT0) формируется 0, что вызывает выполнение подпрограммы в микроконтроллере от внешнего прерывания. В подпрограмме обработки внешнего прерывания необходимо считать состояние порта **D** и определить, какая именно нажата кнопка, а затем перейти на выполнение подпрограммы, выполняющей требуемые функции при нажатии соответствующей кнопки. Таким образом, одно внешнее прерывание обслуживает работу всей клавиатуры.

После осуществления выбора готовых решений и разработки схемотехнических решений отдельных блоков функциональной схемы можно приступить к вычерчиванию принципиальной схемы устройства. Этот этап авторы предлагают читателям выполнить самостоятельно.

8. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОГРАММЫ

Из-за большой сложности и разветвленности привести здесь подробный алгоритм работы программы муфельной печи затруднительно. Поэтому ограничимся его рассмотрением в “укрупненном” варианте.

При разработке алгоритма работы в первую очередь следует обратить внимание на обеспечение выполнения операций (фрагментов программ) наиболее критичных к времени их выполнения.

С этой точки зрения наиболее жесткие требования предъявляются к обеспечению времени дискретизации T_s (см. формулу X.15), т.к. это время непосредственно влияет на точность реализации коэффициентов цифрового интегратора ПИД регулятора и, в конечном счете, на качество работы муфельной печи.

Менее существенные требования предъявляются к периодичности обновления экрана ЖКИ. Практика показывает, что с точки зрения удобства пользователя частота обновления должна находиться в диапазоне от 2 до 20 раз в секунду, что соответствует периоду от 500 до 5 мс соответственно. Оптимальным является среднее значение ≈ 100 мс.

И последнее – частота опроса часов реального времени [DS1307](#). Так как показания часов изменяются не чаще, чем один раз в секунду, то и их опрос необходимо осуществлять столько же раз, это позволит избежать лишней загрузки интерфейса I²C.

Синхронизацию и тактирование временных процессов в микроконтроллере удобно выполнять с помощью имеющихся в нем таймеров/счетчиков. Как правило, в микроконтроллере имеется несколько таких таймеров. Они могут быть 8-ми и 16-ти разрядными, а также иметь в своем составе предварительные делители частоты. Чем выше разрядность таймера/счетчика, тем выше получается точность временного интервала. В выбранном микроконтроллере ATmega16 таких таймеров/счетчиков три, причем два из них 8-ми разрядные, а третий 16-ти разрядный. В приведенном ниже алгоритме работы используется 16-ти разрядный таймер/счетчик 1 микроконтроллера, настроенный на реализацию временного интервала, равного 1 мс. Необходимые в программе временные интервалы реализуются с помощью программных счетчиков, привязанных к периоду 1 мс. Реальное значение T_s в разрабатываемой системе составляет сотни и тысячи мс, поэтому по-

грешность установки периода определяется сотыми и тысячными долями процента, что удовлетворяет решаемую задачу.

Выполнение любой программы на микроконтроллере начинается с настройки портов ввода-вывода. Эта часть алгоритма приведена на рис. [X.XX36](#) под названием “Алгоритм основной программы”. После настройки портов выполняется *фоновая программа*. В начале этой программы (рис. [X.XX37](#)) осуществляется инициализация внешних устройств – ЖКИ, АЦП, ЦАП и т.д., а в конце этой программы реализуется бесконечный цикл, в котором осуществляется обновление выводимой информации на ЖКИ, а при установленном флаге чтения часов (один раз в секунду), выполняется также чтение данных из микросхемы [DS1307](#).

Все остальные операции выполняются в подпрограммах обработки прерываний – рис. [X.XX38](#) - [X.XX40](#).

При нажатии на одну из кнопок клавиатуры, осуществляется переход на выполнение подпрограммы обработки внешнего прерывания INT0. Алгоритмом этой подпрограммы (рис. [X.XX38](#)) предусматривается анализ нажатой кнопки, далее определение типа выводимого экрана дисплея, положения курсора, и в зависимости от этого, выполнение соответствующей операции.

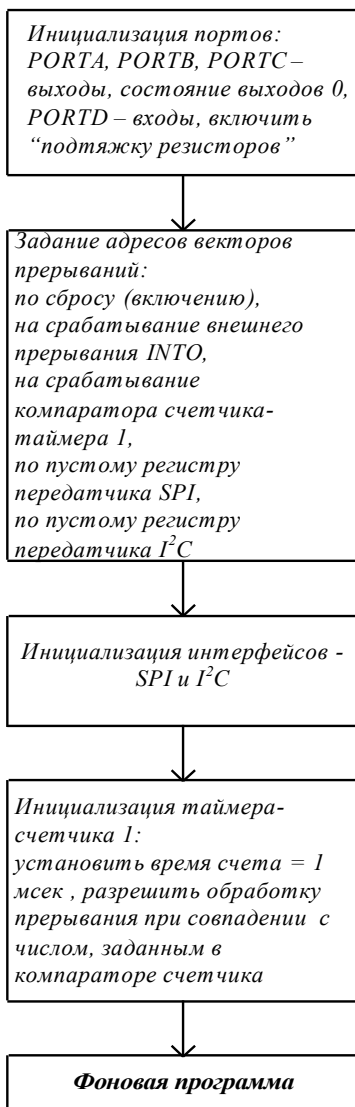


Рис. X.XX36. Алгоритм основной программы

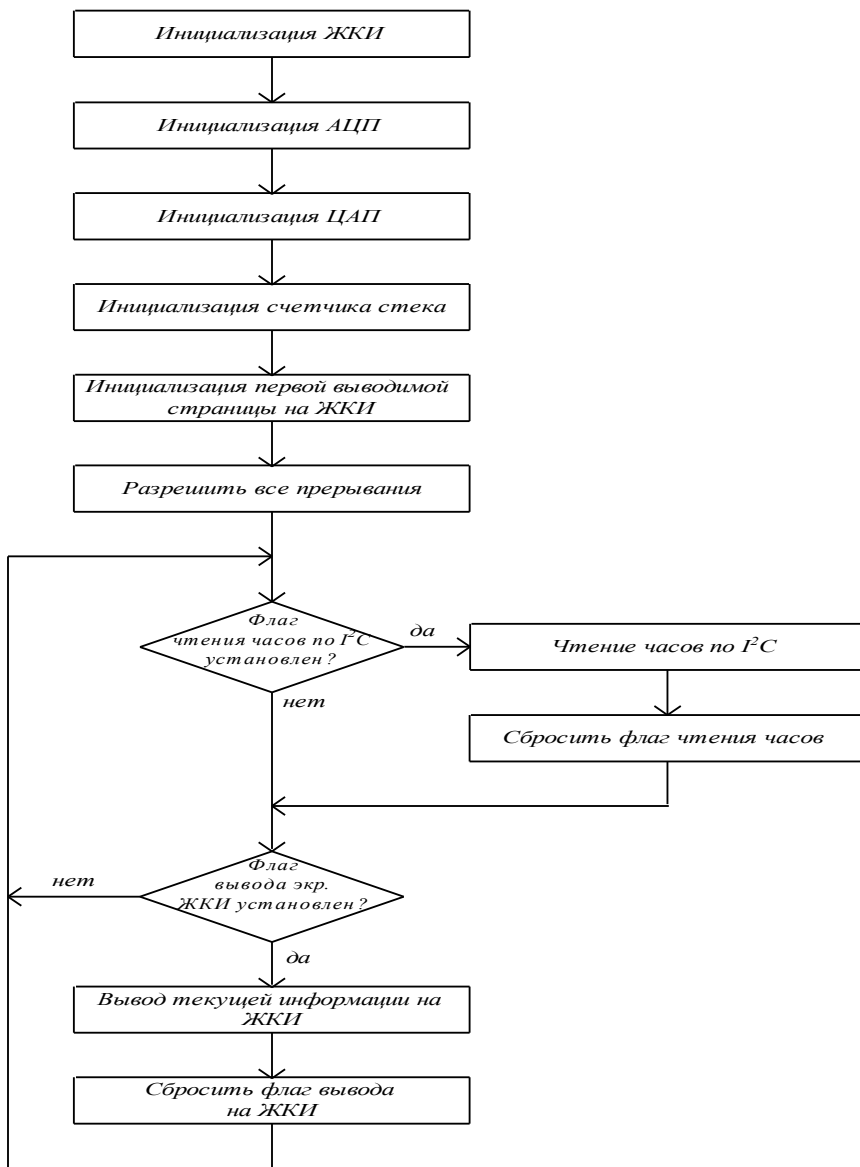
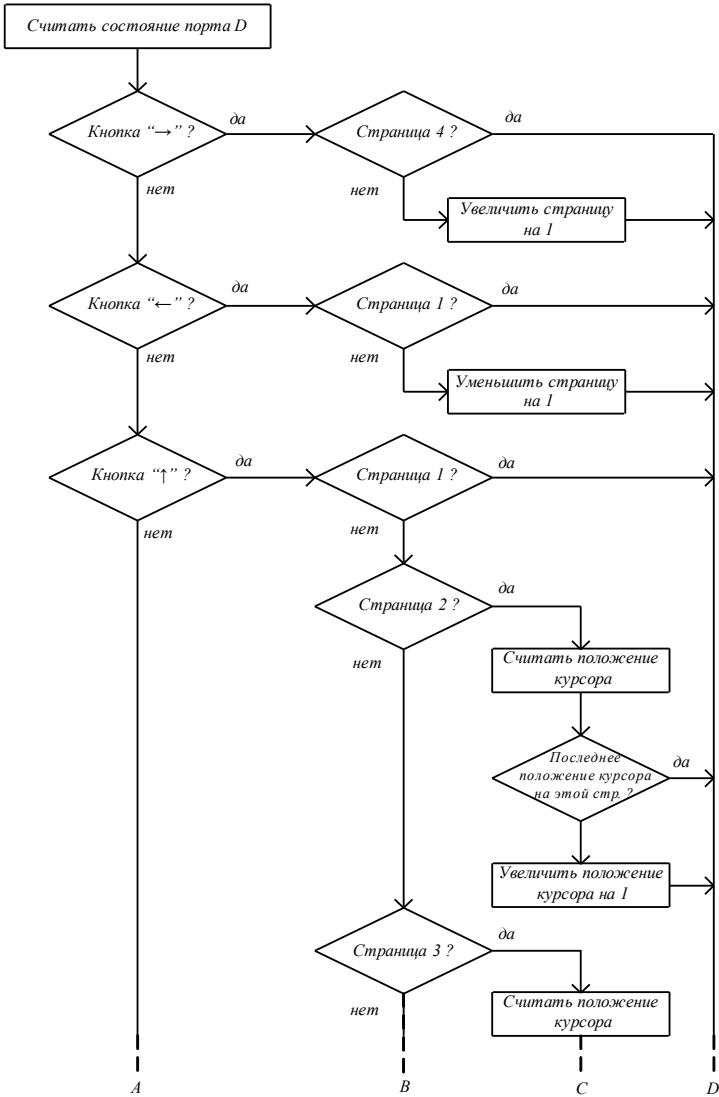
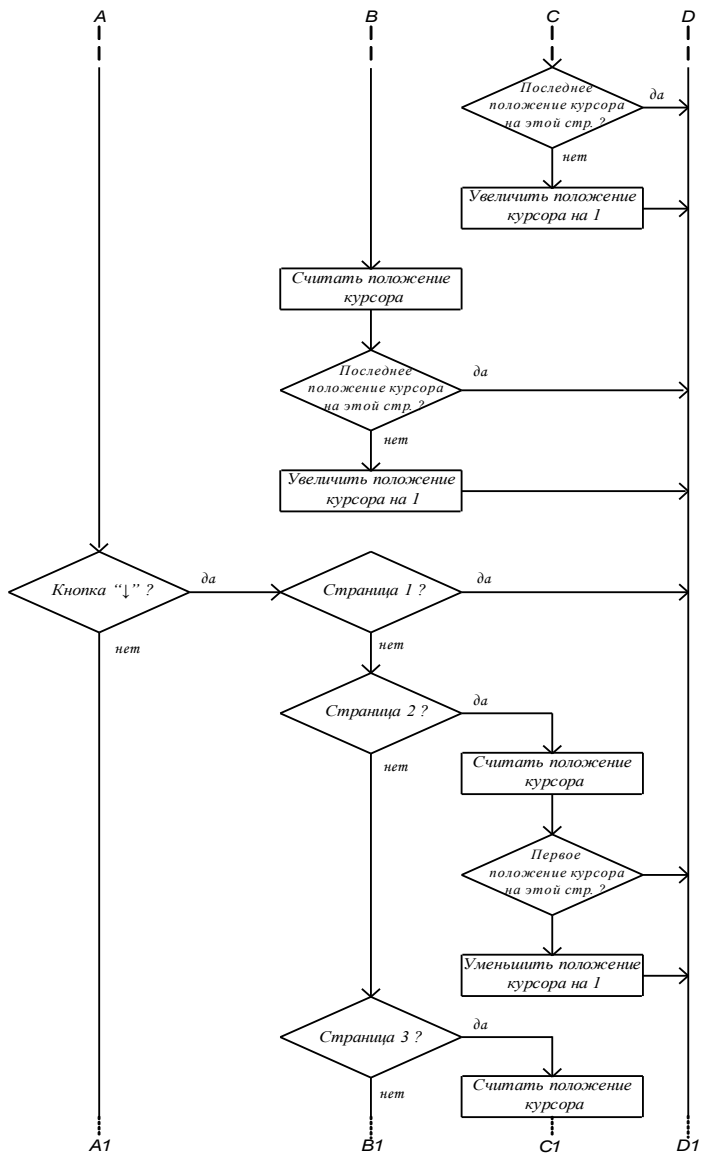
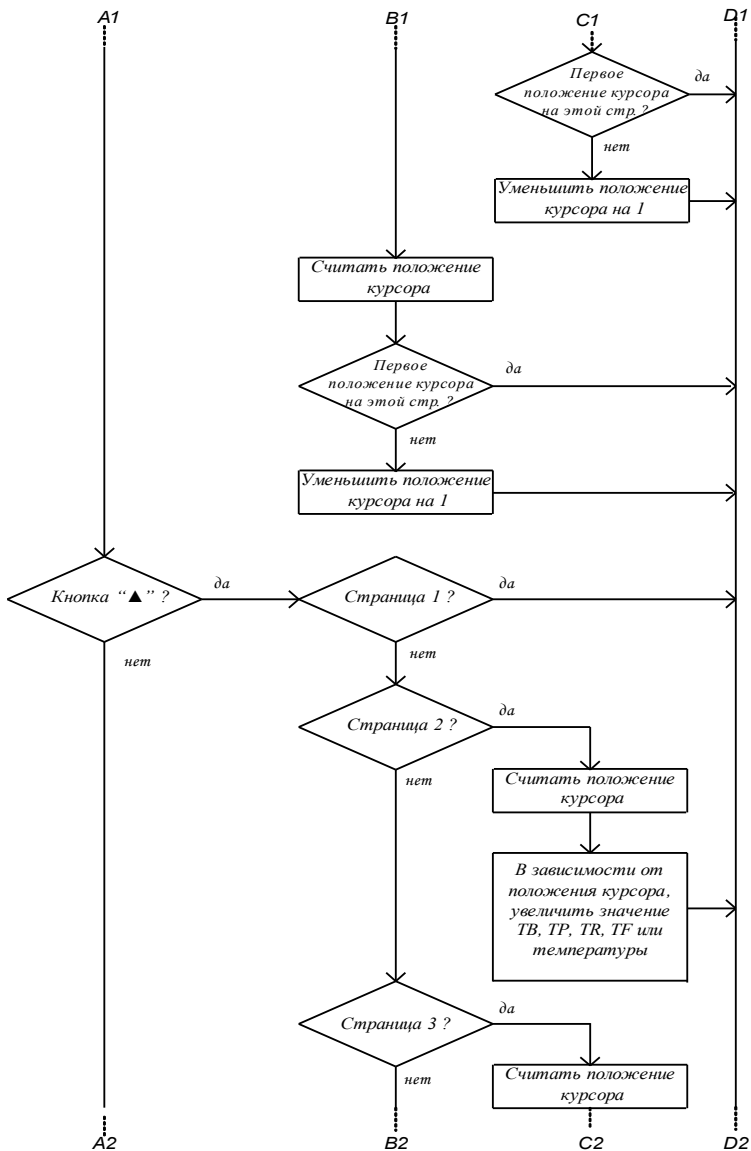


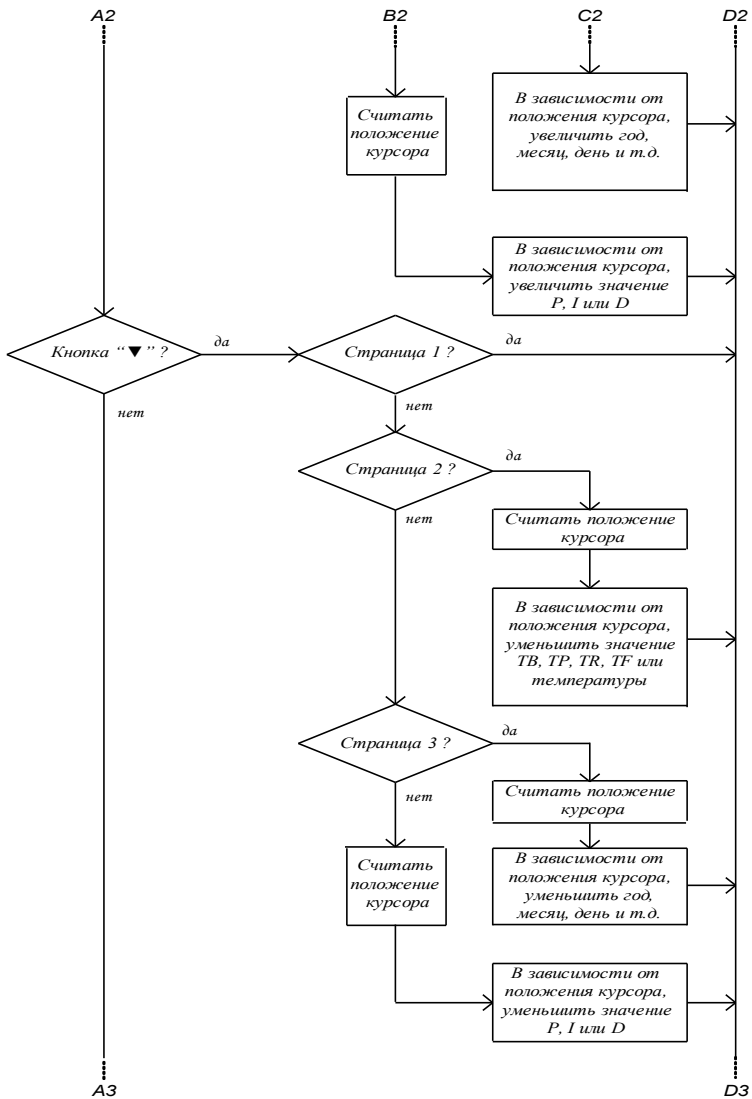
Рис. X.XX37. Алгоритм фоновой программы

Алгоритм подпрограммы обработки внешнего прерывания INT0









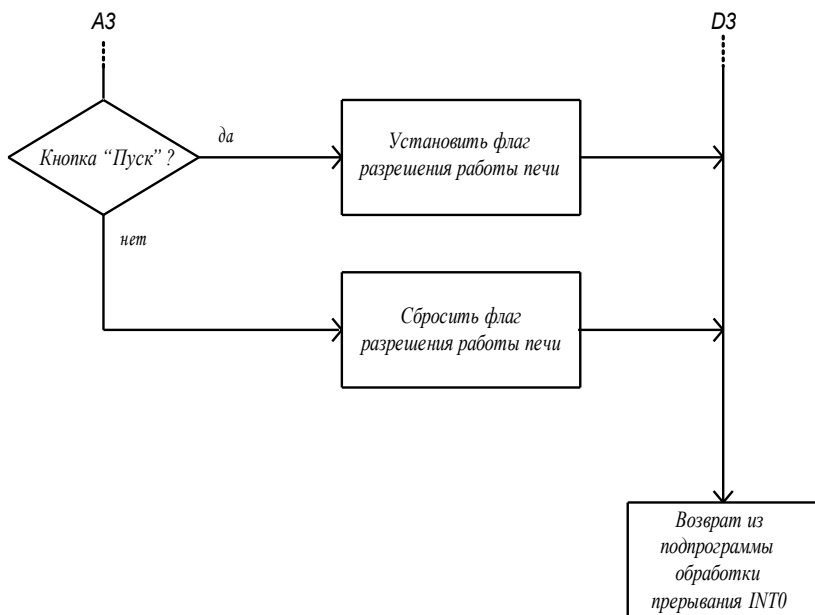


Рис. X.XX38. Алгоритм подпрограммы обработки внешнего прерывания INT0

Считывание результата преобразования АЦП, вычисление управляющего воздействия, выдача результата в ЦАП, производится с периодом, задаваемым T_s . Для его задания в микроконтроллере используется таймер-счетчик 1. В инициализационной части программы (см. рис. X.XX36) таймер настраивается на реализацию прерываний каждую миллисекунду. Поэтому подпрограмма, приведенная на рис. X.XX39, выполняется каждую миллисекунду. В ней программным способом реализован счетчик для формирования каждую секунду флага запуска подпрограммы считывания часов, а также счетчик с периодом T_s , при достижении которого разрешается работа SPI, разрешается прерывание по пустому регистру передатчика SPI и начинается считывание первого байта результата преобразования АЦП.

В дальнейшем обработка принятых данных от АЦП по интерфейсу SPI осуществляется в соответствии с алгоритмом, приведенным на

рис. [X.XX40](#). После окончания приема третьего байта данных от АЦП, запрещается работа SPI, выполняется расчет управляющего воздействия, и если не занят интерфейс I²C – передача рассчитанного значения в ЦАП.

После подробной проработки алгоритма работы системы можно приступить к написанию и отладке программы. Этот этап авторы предлагают выполнить читателям самостоятельно. При написании программы на ассемблере можно воспользоваться готовыми фрагментами программ из примеров, приведенных в этой книге.

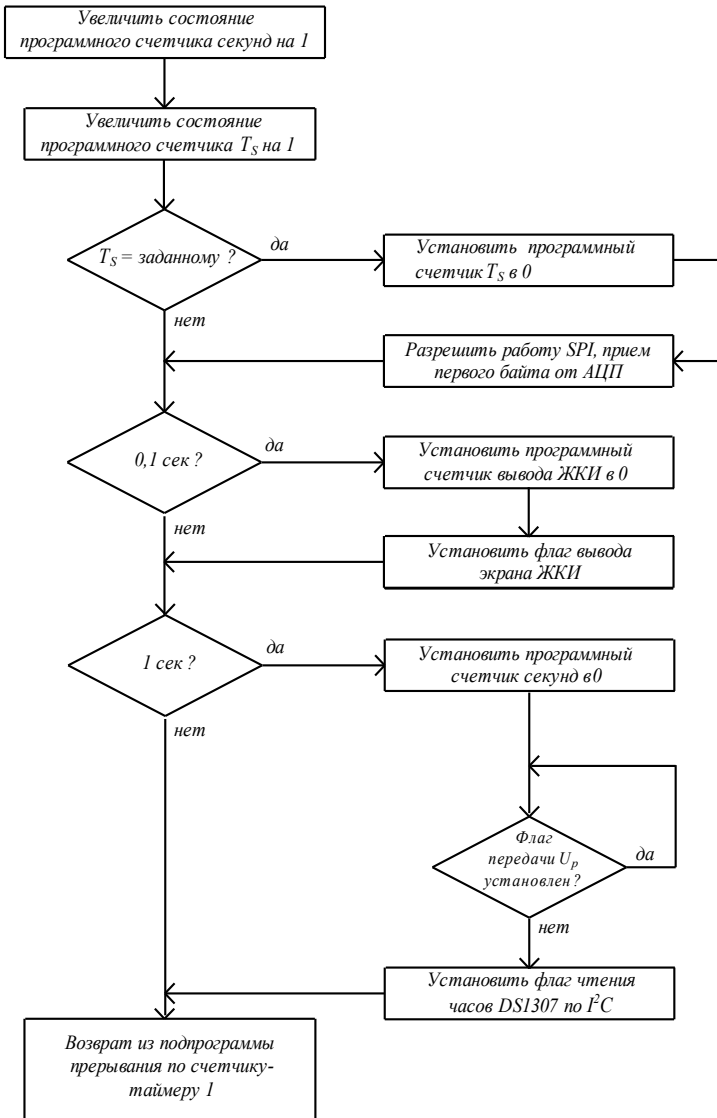


Рис. X.XX39. Алгоритм подпрограммы обработки прерывания при “срабатывании” компаратора таймера-счетчика 1

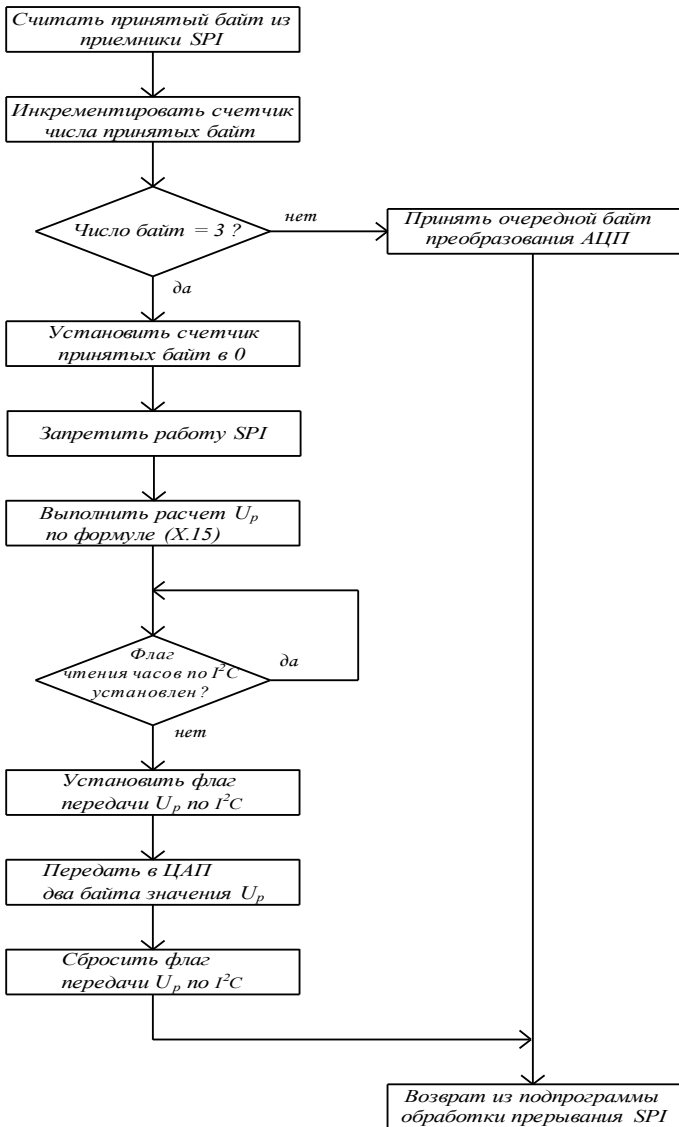


Рис. X.XX40. Алгоритм подпрограммы обработки прерывания по принятому байту в приемник SPI (по пустому регистру передатчика SPI)

После подробной проработки алгоритма работы системы можно приступить к написанию и отладке программы. Этот этап авторы предлагают выполнить читателям самостоятельно. При написании программы на ассемблере можно воспользоваться готовыми фрагментами программ из примеров, приведенных в учебном пособии [1].

Литература

1. Иванов Ю.И., Чернов Н.И., Югай В.Я. Микропроцессорные системы управления / Учебное пособие / Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 321 с.