

УДК 62-503.55

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ЭКСТРУДЕРА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ФАБРИКАТОРА

Малышев К.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»*

*Научный руководитель: Арабов Д.И., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

Shakhnov@iu4.bmstu.ru

Введение

Работа посвящена разработке устройства для управления температурой экструдера в печатающем модуле многофункционального фабриката, а также разработке методик интегрирования данного устройства в программный комплекс LinuxCNC.

Объектом исследования является нагревательный элемент экструдера, датчик снятия температуры экструдера, а также структура программы управления станками с ЧПУ «LinuxCNC», а именно её аппаратный уровень абстракции, позволяющий подключать дополнительные устройства.

В настоящее время одним из основных способов обработки материалов остается фрезерование. Это субтрактивный метод обработки и он имеет следующие преимущества: высокое качество обработки поверхности и высокая скорость обработки деталей. Данный метод не лишен и отрицательных качеств: им нельзя создавать сложные формы, а количество вспомогательного материала может быть очень велико. С помощью аддитивного метода можно в несколько раз сократить материал поддержки, а сложность изготавливаемых форм может быть на порядок сложнее. Если же объединить два рассматриваемых метода, можно получить оборудование, обладающее положительными качествами обоих методов обработки.

Концепция рассмотренной технологии изготовления называется SDM (Shape Deposition Manufacturing – производство наращиванием и удалением) [1], предложенной в университете Карнеги-Мелон (Питтсбург, штат Пенсильвания, США). Этот принцип заключается в следующем (рисунок 1). Сначала, как и в любой другой технологии, 3D модель объекта оптимально ориентируется в пространстве построения и дополняется

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/637929.html>

системой поддержки, чтобы возможно было нарастить «нависающие» элементы. Затем объект с уже добавленной системой поддержки разбивается на сегменты, так называемые компакты. Формирование компактов происходит в определённом порядке – сначала компакт наращивается аддитивным способом, а затем его верхняя поверхность корректируется фрезой. При формировании последующего верхнего компакта, его верхняя поверхность будет так же обработана фрезой, а нижняя - будет точно сформирована уже обработанным компактом под ним.

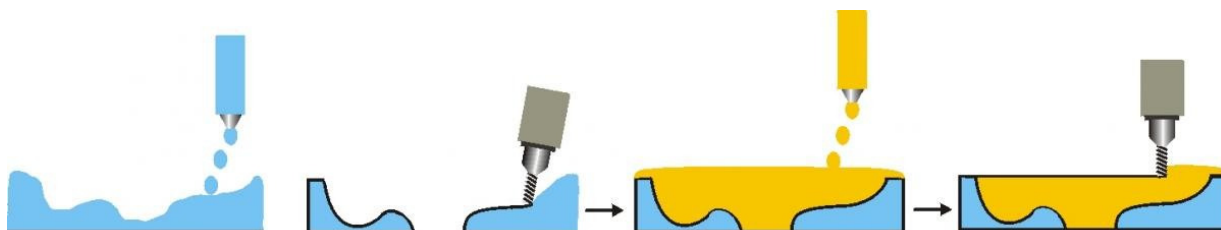


Рис. 1. Процесс производства наращиванием и удалением

Таким образом, с одной стороны мы можем сформировать объект любой сложности, включая готовые механизмы, что характерно для аддитивных технологий, и с другой стороны - имеем высокое качество поверхности, что присуще субтрактивным. Более того, в процессе построения объекта возможно «вкладывать» в него инородные объекты, например электронику, механизмы и прочее, точно позиционируя их в объёме создаваемого объекта (рисунок 2).

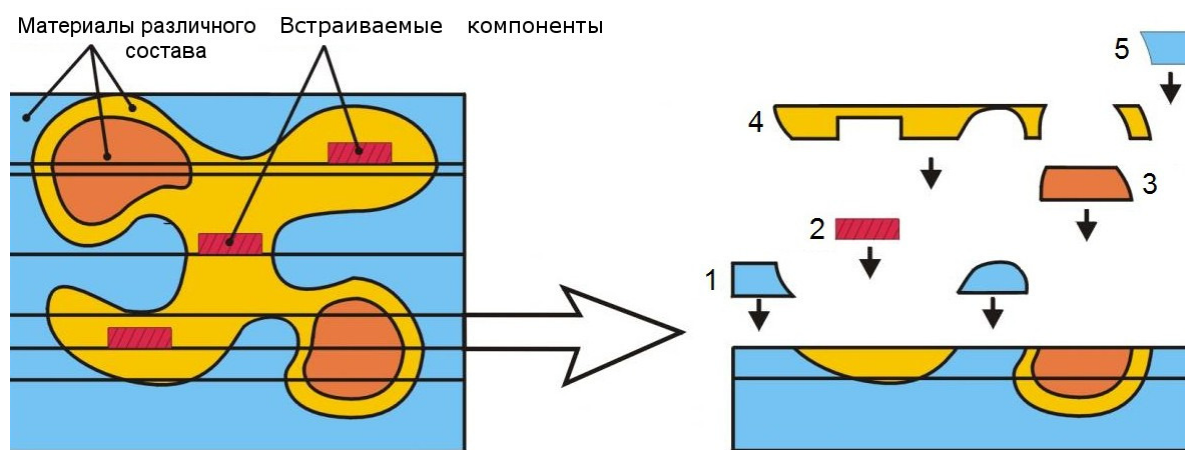


Рис. 2. Модели с гетерогенной структурой

(голубым обозначен материал поддержки, жёлтым и оранжевым различные материалы объекта, красным – встраиваемые компоненты)

Тем не менее, технология SDM пока не реализована на уровне доступных персональных устройств, что является целью большого проекта, неотъемлемая часть которого – это реализация системы терморегулирования экструдера печатающей головки.

1 Модель терморегулирования экструдера многофункционального фабрикатора

Экструдером многофункционального фабрикатора называется такая его часть, которая отвечает за расплавление пластмассового прутка (технология FDM [2]). Экструдер состоит из нескольких основных элементов:

- терморегулятор (обеспечивает нагрев и расплав прутка, охлаждение прутка, а также поддержание заданной температуры);
- система подачи прутка (обеспечивает проталкивание прутка через сопло);
- сопло (формирует толщину расплавленной пластмассы на выходе).

Терморегулятор в свою очередь состоит из нагревателя, охладителя, датчика температуры и устройства управления, осуществляющего контроль нагрева и поддержание заданной температуры.

Задача выбора нагревательного элемента состоит в том, чтобы при подаче прутка с определенной силой на выходном конце сопла прутки пластика были расплавлены в вязкую массу при температуре 300 °С, при этом температура прутка выше сопла должна оставаться в пределах от +20 °С до +40 °С.

На рынке нагревательных элементов в настоящее время представлено множество различных решений. Все предлагаемые нагревательные элементы различаются в основном по следующим параметрам: материал, форма, назначение, предельные температурные режимы.

После анализа рынка был сделан вывод, что наиболее подходящим нагревательным элементом будут нагревательные элементы из фехрали и нихрома (нихромовая и фехралевая проволоки).

Далее был произведен расчет параметров нагревательного элемента: длину и диаметр. При этом были наложены ограничения, определяемые параметрами используемого источника питания: напряжение 43 В, максимальный постоянный ток 3 А.

Минимальная площадь поперечного сечения нихромовой проволоки зависит от максимального тока через нагревательный элемент и может быть определена по таблице: для рабочей температуры 300 °С, и номинального значения тока 3 А, минимальный диаметр проволоки равен 0,5 мм [3], а площадь поперечного сечения проволоки в этом случае будет равна 0,196 мм². Удельное сопротивление нихрома (X20H80-H) равно 1,08 мкОм·м [4]. При неизменных величинах общего сопротивления и удельного

сопротивления длина прямо пропорциональна площади поперечного сечения. Конструктивные особенности сопла экструдера, на которое наматывается данная проволока, ограничивают максимальная длину проволоки величиной 1,55 м. Максимальное сопротивление проволоки с учетом максимальной длины будет равно

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{1,08 \left(\text{Ом} \cdot \frac{\text{мм}^2}{\text{м}} \right) \cdot 1,55 \text{ м}}{0,196 \text{ мм}^2} = 8,54 \text{ Ом}.$$

где ρ – удельное сопротивление нихрома, Ом·мм²/м;

l – длина проволоки, м;

S – площадь поперечного сечения, мм².

Ограничив ток через нагревательный элемент, можно посчитать мощность нагревателя по формуле:

$$P = I^2 R_{\text{нэ}} = (3 \text{ А})^2 \cdot 8,54 \text{ Ом} = 76,86 \text{ Вт}.$$

Параметры нагревательного элемента будут следующие:

- напряжение питания 43 В;
- сила тока через нагревательный элемент 3 А;
- диаметр проволоки нагревательного элемента 0,5 мм;
- длина проволоки нагревательного элемента 1,55 м;
- сопротивление нагревательного элемента 8,54 Ом;
- мощность нагревателя 76,6 Вт.

Для увеличения выделяемой мощности необходимо увеличивать длину проволоки, что требует изменении конструкции сопла.

Одной из основных частей терморегулятора является также датчик температуры. Он необходим для осуществления обратной связи по температуре, и без него реализовать полноценную систему управления температурой не представляется возможным.

В настоящее время наибольшее распространение среди датчиков температуры получили термопары, полупроводниковые термисторы и термометры сопротивления. Они различаются по таким параметрам как точность, диапазон рабочих температур, тип выходного сигнала.

Для решения поставленной задачи терморегулирования требуется выбрать датчик температуры с подходящим рабочим диапазоном температур (не ниже 300°С) и Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

точностью измерения температуры до 2°C . Полупроводниковый термометр не удовлетворяет условию максимального диапазона температур. Термометр сопротивления и термопара подходят по всем параметрам, но без компенсации опорного спая термопара имеет точность измерения ниже, чем у термометра сопротивления. Также снятие информации с термопары требует дополнительных микросхем, в то время как для термометра сопротивления в простейшем случае требуется один резистор. К тому же зависимость ТЭДС от температуры у термопары существенно не линейна, в то время как зависимость сопротивления термометра сопротивления очень близка к линейной, что облегчает обработку информации о температуре.

Термометры сопротивления с медным и никелевым чувствительным элементом имеют рабочий диапазон измерений в пределах от -60°C до $+200^{\circ}\text{C}$. Так как такой рабочий диапазон не устраивает, то выберем платиновый термометр сопротивления, с помощью которого возможно измерять температуру в пределах от -200°C до 660°C . В силу того, что пленочные термометры сопротивления более распространены, чем проволочные, для реализации поставленной задачи применим пленочный термометр сопротивления [5].

2 Проектирование блока управления терморегулятором

Устройство управления, входящее в состав терморегулятора, также является его неотъемлемой частью. В круг задач этого устройства входят следующие функции:

- 1) получение информации о текущей температуре сопла с датчика температуры (термометра сопротивления);
- 2) обработка информации о текущей температуре, заданной температуре и выработка соответствующего решения о включении или выключении нагревательного элемента (нихромовая проволока);
- 3) получение информации о требуемой температуре от программы LinuxCNC.

Функция определения времени включения нагревательного элемента может быть реализована разными способами. Самый простой алгоритм реализации данной функции представлен на рисунке 3.

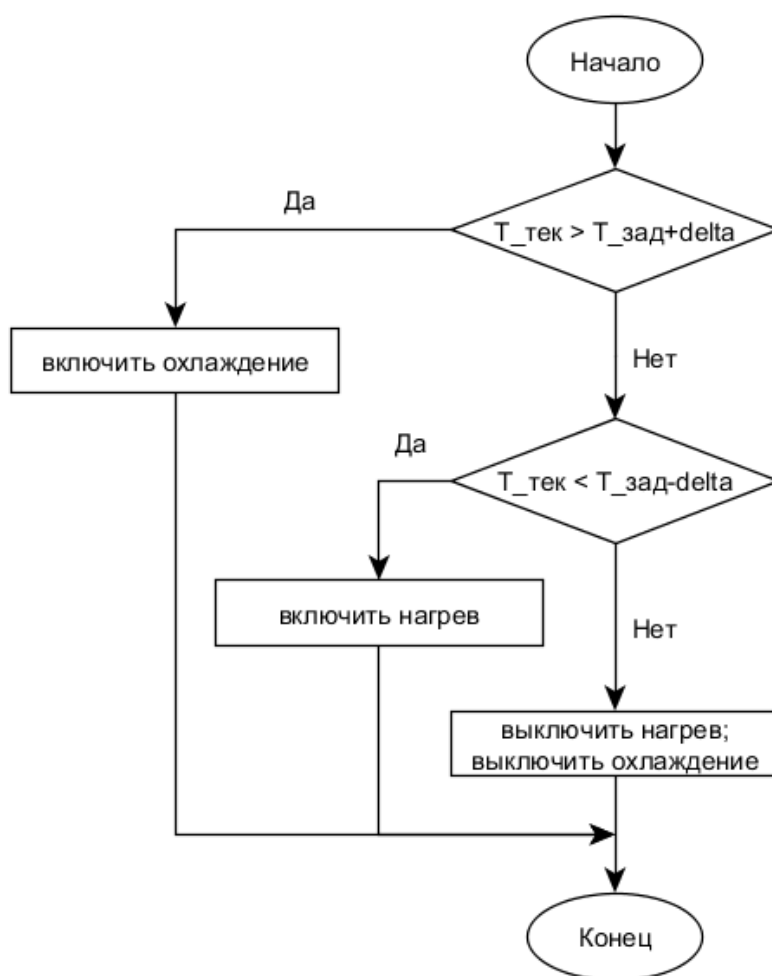


Рис. 3. Простейший алгоритм реализации функции принятия решения о нагреве или охлаждении сопла, где $T_{\text{тек}}$ – текущее значение температуры, $T_{\text{зад}}$ – заданное значение температуры, δ – половина максимального отклонение от заданной температуры

Из представленной схемы видно, что текущая температура сравнивается с границами заданной температуры ($T_{\text{зад}} - \delta$) и ($T_{\text{зад}} + \delta$) и, если она выходит за этот диапазон, то принимаются соответствующие действия по нагреву или охлаждению. В случае если текущая температура входит внутрь этого диапазона, нагреватель и охладитель отключаются.

При реализации устройства управления температурой экструдера требуется предусмотреть следующий функционал, который должно иметь устройство [6-8]:

- коммутация высоких токов для работы нагревательного элемента;
- измерение тока, протекающего через нагревательный элемент для управления током;
- измерение температуры нагревательного элемента;

- связь с компьютерной программой LinuxCNC посредством интерфейса RS-232 [6] и протокола MODBUS;
- индикация работы: устройство включено/отключено, нагрев запущен/остановлен, обмен информацией с программой LinuxCNC есть/нет.

С учетом перечисленных требований разработана структурная схема, которая представлена на рисунке 4.

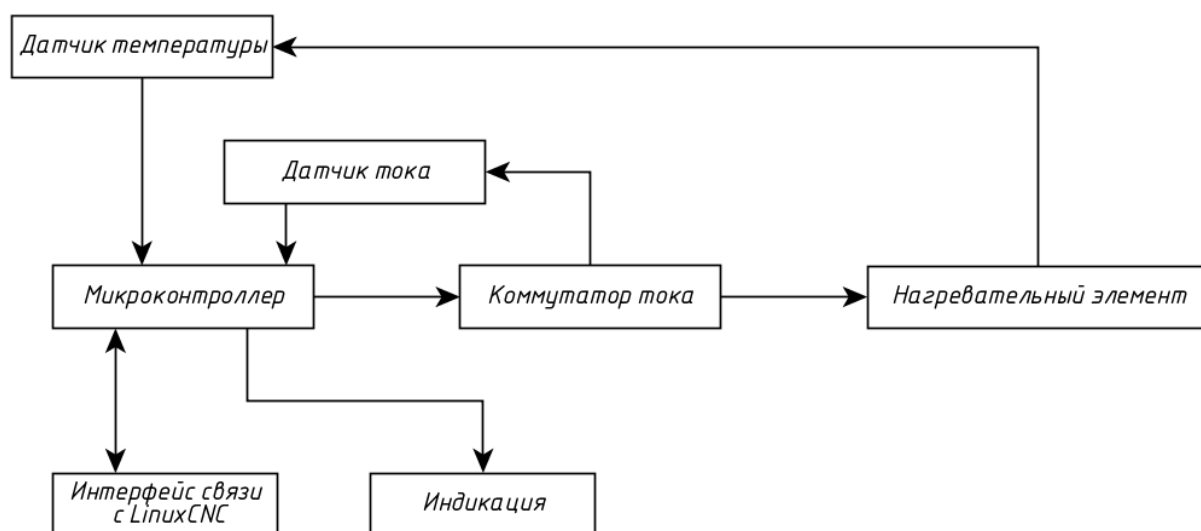


Рис. 4. Структурная схема терморегулятора многофункционального фабрикатора

Как видно из рисунка помимо узлов, выполняющих выше перечисленные функции в схеме представлен микроконтроллер, который является центральным элементом схемы и объединяет все узлы вместе. Он необходим для обработки информации с датчиков, управления коммутатором тока, управления индикацией и обеспечения связи с LinuxCNC.

На основе схемы электрической структурной разработана схема электрическая функциональная.

С учетом разработанной функциональной схемы и выбранной элементной базы разработана схема электрическая принципиальная терморегулятора многофункционального фабрикатора.

При разработке программного обеспечения необходимо определить функции, которые оно должно выполнять. Данная информация представлена с помощью модели вариантов использования. На этой модели отражены планируемые функции системы (прецеденты системы), их окружения (актеры) и связи между прецедентами и актерами (диаграмма вариантов использования). Диаграмма вариантов использования разрабатываемой системы показана на рисунке 5.

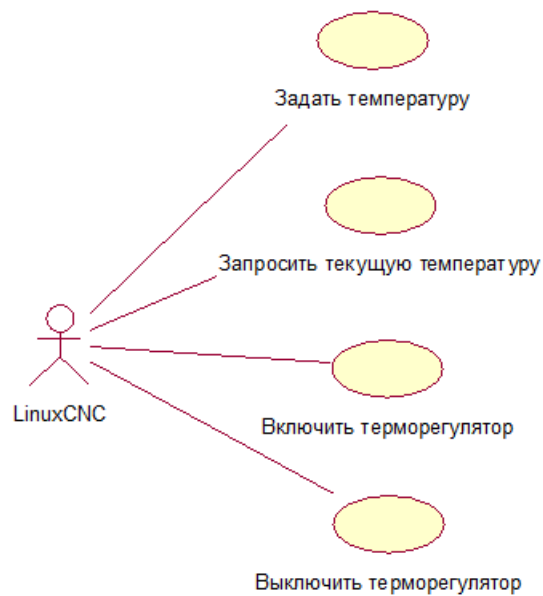


Рис. 5. Диаграмма вариантов использования программного обеспечения системы терморегулирования многофункционального фабрикатора

Из диаграммы вариантов использования видны основные функции, которые должно выполнять устройство по командам от управляющей программы LinuxCNC. Передача команд осуществляется через интерфейс RS232 посредством протокола Modbus. Программа LinuxCNC является при этом ведущим устройством, отсылая запросы терморегулятору. После принятия запроса терморегулятор обрабатывает запрос и формирует ответ согласно используемому протоколу (Modbus).

Затем были реализованы функции, необходимые для реализации функционала, отображенного на диаграмме вариантов использования.

В листинге 1 представлена функция обработки прерывания по окончанию работы АЦП. В приведенной функции реализован алгоритм, разработанный в предыдущей главе. Здесь происходит считывание значения АЦП, которое преобразуется в температуру нагревателя. Затем происходит сравнение рассчитанной текущей температуры с границами заданной температуры. Если текущая температура превышает установленные границы, то происходит включение нагревателя. Если текущая температура меньше установленных границ, то начинается охлаждение - включается вентилятор. Если же текущая температура находится в установленных границах, то вентилятор и нагреватель отключаются.

Листинг 1 – Функция обработки прерывания по окончанию работы АЦП

```
/*считываем текущее значение АЦП*/
cur_temp=ADC;
/*преобразуем значение АЦП в температуру*/
cur_temp=(uint16_t) (((uint32_t) (cur_temp))*3-1024)*1000000/3925/(1024-
cur_temp);

/*если выставлен флаг работы, то необходимо принять решение о
выключении/выключении нагревателя/охладителя*/
if(flags & (1<<WORK) )
{
    /*текущая температуры меньше заданной*/
    if(cur_temp < (adj_temp-DELTA) )
    {
        HEATER_ON;
        COOLER_OFF;
        flags&=~(1<<COOL);
        flags|=(1<<HEAT);
    }
    /*текущая температуры входит в заданные границы*/
else if( (cur_temp > (adj_temp-DELTA)) & (cur_temp < (adj_temp+DELTA)) )
    {
        COOLER_OFF;
        HEATER_OFF;
        flags&=~(1<<COOL);
        flags&=~(1<<HEAT);
        flags|=(1<<WARM);
    }
    /*текущая температура превышает заданные пределы*/
else if(cur_temp > (adj_temp+DELTA))
    {
        COOLER_ON;
        HEATER_OFF;
        flags&=~(1<<HEAT);
        flags|=(1<<COOL);
    }
}
```

Для интеграции разработанного устройства управления с программой управления станками с ЧПУ «LinuxCNC» используется HAL (hardware abstraction layer - уровень аппаратной абстракции). Данный уровень позволяет создавать скрипты, определяющие поведение программы, а результаты выполнения скриптов отправлять в другие функции посредством соединения так называемых пинов (переменные) в сети (присваивание переменных).

Для визуального контроля параметров терморегулятора и управления им используется XML-разметка, которая хранится в определенном файле и автоматически подключается программой LinuxCNC при запуске.

Для отображения организации компонентов, необходимых для интеграции терморегулятора в программу LinuxCNC, разработана диаграмма компонентов, представленная на рисунке 6.

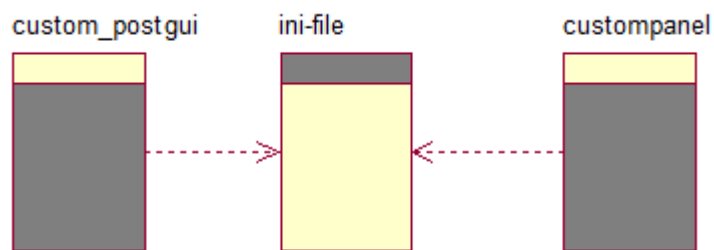


Рис. 6. Диаграмма компонентов програм много модя для связи устройства с LinuxCNC

Из диаграммы видно, что компоненты custom_postgui и custompanel связаны с помощью компонента ini-file.

Компонент custompanel содержит описание дополнительной панели. Для полноценного управления устройством контроля температурой необходимо разработать дополнительную панель управления, состоящую из следующих элементов:

- отображение текущей температуры;
- задание температуры;
- включение терморегулятора;
- выключение терморегулятора.

Результат выполнения разработанного кода для формирования пользовательского интерфейса представлен на рисунке 7.

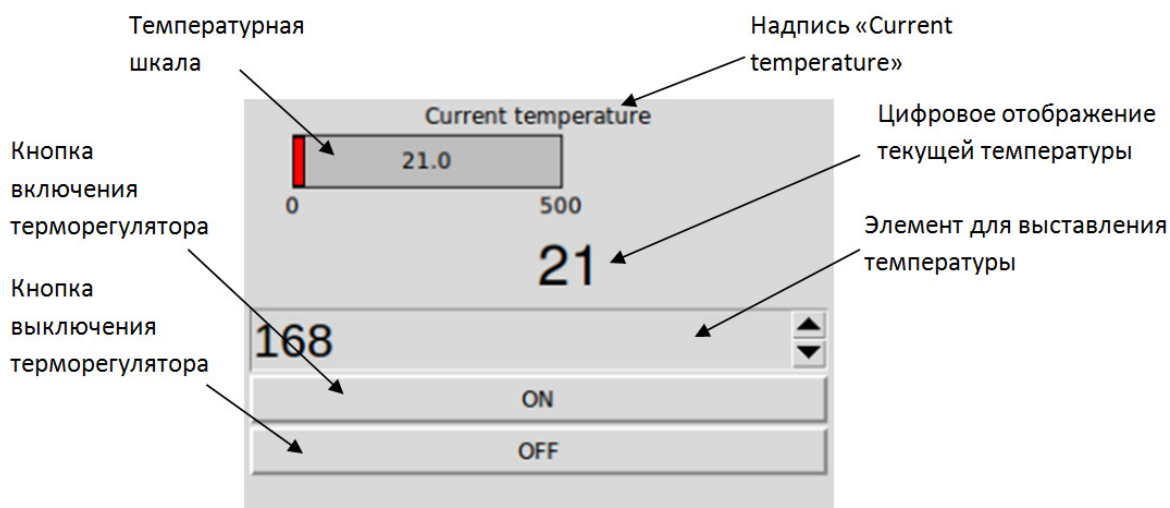


Рис. 7. Дополнительная панель интерфейса пользователя программы LinuxCNC

Для связи разработанного интерфейса с устройством управления температурой можно либо написать программу с собственным протоколом обмена и затем скомпилировать ее, либо воспользоваться готовым модулем Classicladder, который

позволяет обмениваться информацией с внешними устройствами по протоколу modbus. Данный модуль автоматически создает пины (переменные), в которые необходимо соединить с пинами интерфейса. Описание сетей находится в файле custom_postgui.hal, который приведен в листинге 2.

Листинг 2 – Описание интерфейса дополнительной панели

```
#подключение функции конвертации целого числа в вещественное
loadrt conv_s32_float count=1
#подключение функции конвертации из вещественного числа в целое
loadrt conv_float_s32 count=1

#запуск функций конвертации
addf conv-s32-float.0 servo-thread
addf conv-float-s32.0 servo-thread

#создание сети tempConvIn, которая переменную модуля
#classicladder соединяет с интерфейсом (отображение текущей
#температуры в виде числа) и конвертером
net tempConvIn conv-s32-float.0.in <= pyvcp.my-number <=
classicladder.0.s32out-03

#сконвертированная текущая температура соединяется со шкалой #отображения
температуры
net tempConvOut conv-s32-float.0.out => pyvcp.temperature-current

#описание поля задания температуры
net tempSetIn conv-float-s32.0.in <= pyvcp.temperature-set
net tempSetOut conv-float-s32.0.out => classicladder.0.s32in-03

#описание сетей соединяющих кнопки и classicladder
net on classicladder.0.in-03 <= pyvcp.on-button
net off classicladder.0.in-04 <= pyvcp.off-button
```

Таким образом, после описания всех сетей данные из дополнительной панели интерфейса будут отправляться в модуль classicladder, откуда будут переданы в устройство управления. Также информация, поступившая в classicladder будет отображаться на дополнительной панели.

Отладка алгоритма работы разработанного устройства производилась с помощью макетной платы. Устройство экспериментального стенда показано на рисунке 8.

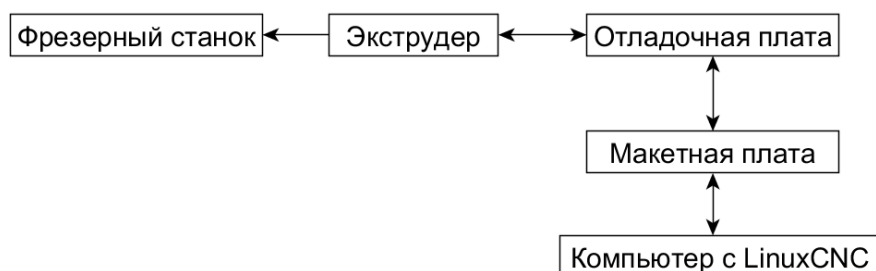


Рис. 8. Структура экспериментального стенда системы терморегулирования

Силовая часть устройства установлена в экструдере, который установлен в фрезерный станок вместо шпинделя. Управляющие выводы экструдера подключены к отладочной плате, на которой установлен микроконтроллер ATmega16, который полностью совместим с ATmega32. Для подключения микроконтроллера к компьютеру по интерфейсу RS232 использована макетная плата с установленной на ней микросхемой преобразователя интерфейсов UART-RS232. Изображение экспериментального стенда приведено на рисунке 9.

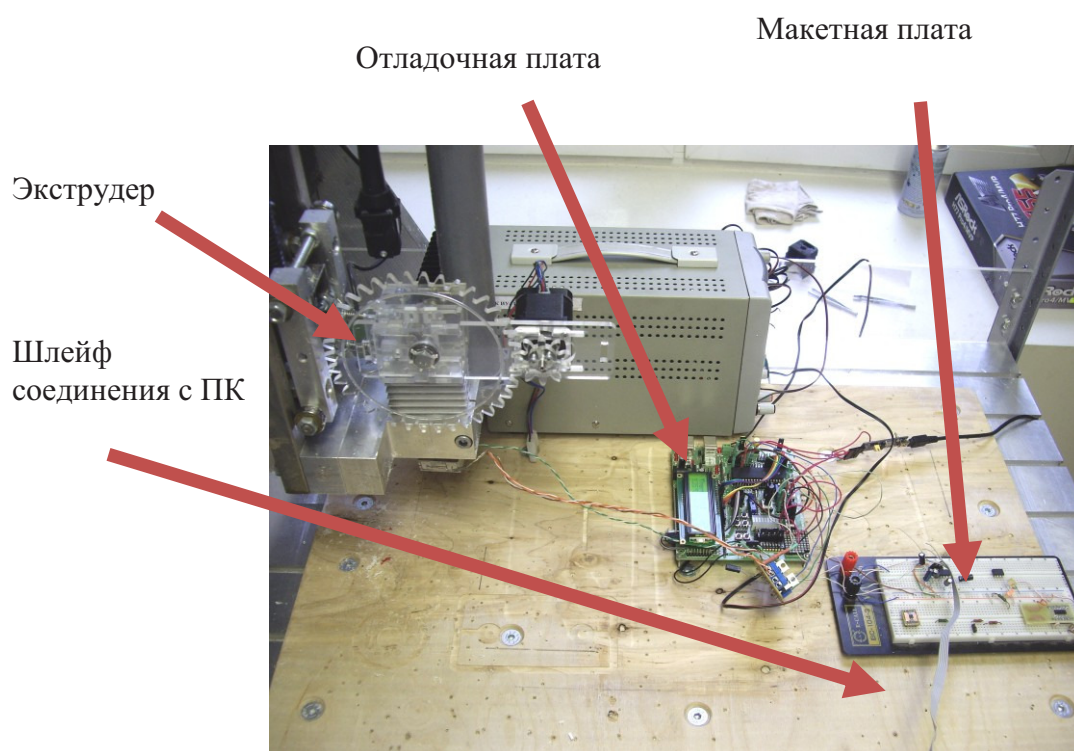


Рис. 9. Изображение экспериментального стенда

После отладки алгоритма работы терморегулятора был собран опытный образец разработанного устройства. Опытный образец в разобранном состоянии представлен на рисунке 10. Экструдер после сборки с разработанным устройством терморегулирования представлен на рисунке 11.

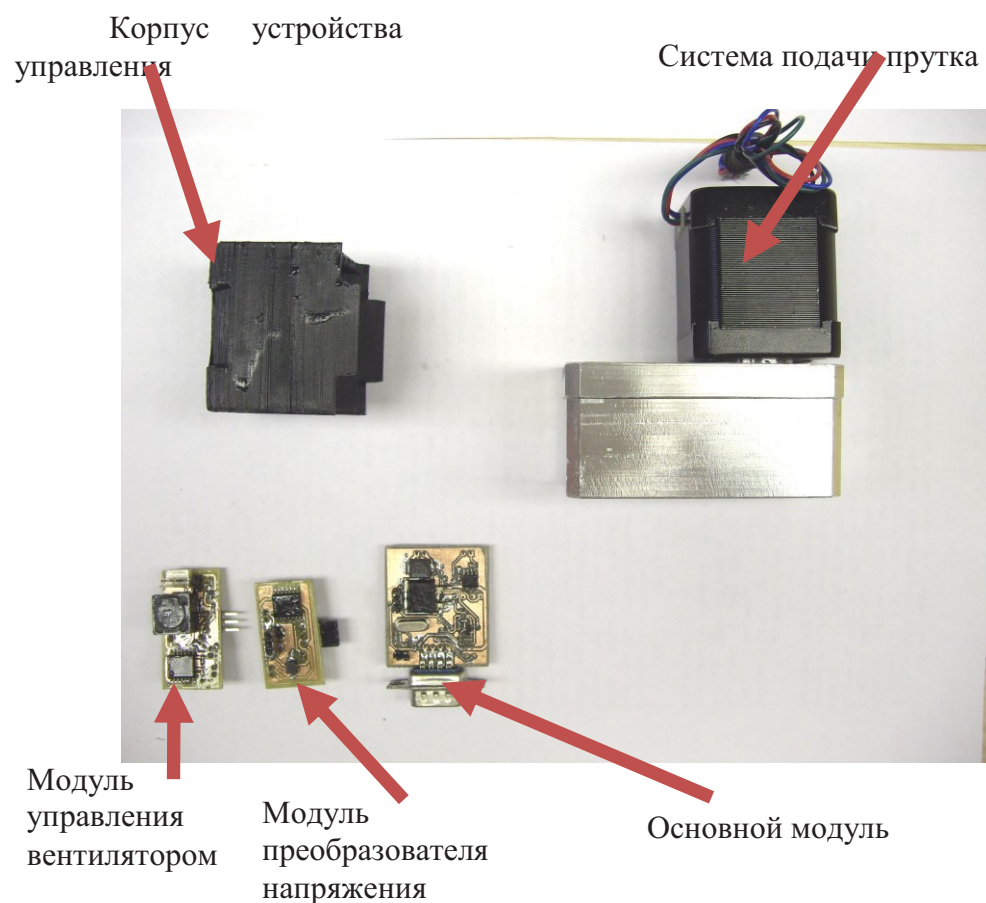


Рис. 10. Опытный образец экструдера в разобранном виде

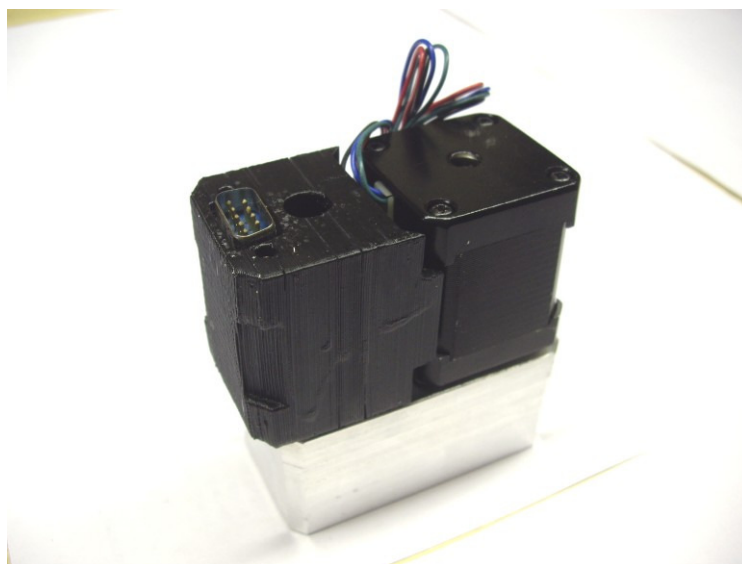


Рис. 11. Опытный образец экструдера в собранном виде

Опытный образец экструдера был установлен вместо первого варианта и с ним проводились эксперименты исследования работы экструдера.

Программа испытаний включает в себя проверку способности разработанного устройства нагреть экструдер до температуры 300 °С, управляя при этом из программы LinuxCNC. Таким образом, последовательность действий при проведении испытаний будет состоять из следующих пунктов:

- 1) запустить программу LinuxCNC и подать питание на фрезерный станок, включая экструдер и устройство управления;
- 2) в программе LinuxCNC выставить температуру для нагрева равную 300 °С;
- 3) в программе LinuxCNC включить экструдер, нажав кнопку «ON»;
- 4) дождаться пока экструдер нагреется до 300 °С, отслеживая температуру в программе LinuxCNC по шкале температуры или по цифровому индикатору температуры;
- 5) в программе LinuxCNC выставить температуру для нагрева равную 30 °С;
- 6) дождаться пока экструдер охладится до температуры 30 °С;
- 7) в программе LinuxCNC включить экструдер, нажав кнопку «OFF»;
- 8) выключить фрезерный станок и программу LinuxCNC.

В результате выполнения перечисленных пунктов для каждого шага должен быть получен ожидаемый результат:

- 1) программа LinuxCNC запущена без ошибок, индикация включения устройства управления фрезерным станком включилась;
- 2) элемент задания температуры будет отображать цифру 300;
- 3) включится индикатор нагрева на устройстве управления температурой;
- 4) индикатор отображения текущей температуры будет постепенно увеличивать значение, шкала температуры заполняется до значения 300;
- 5) включится индикатор охлаждения;
- 6) индикатор отображения текущей температуры постепенно уменьшает значение, шкала температуры уменьшает значение параметра до значения 30;
- 7) индикация охлаждения и нагрева отключится;
- 8) индикация питания фрезерного станка выключится, программа LinuxCNC закроется.

В случае получения ожидаемых результатов испытания считаются успешно пройденными, и значит, устройство работает правильно.

Проведение испытаний осуществлялось также с использованием виртуального измерительного комплекса. Данные о температуре с микроконтроллера передавались в

программу посредством переходника UART-USB и затем отображались на экране программы в виде графика изменения температуры от времени.

Зависимость температуры от времени при нагреве до температуры 300 °С представлен на рисунке 12.

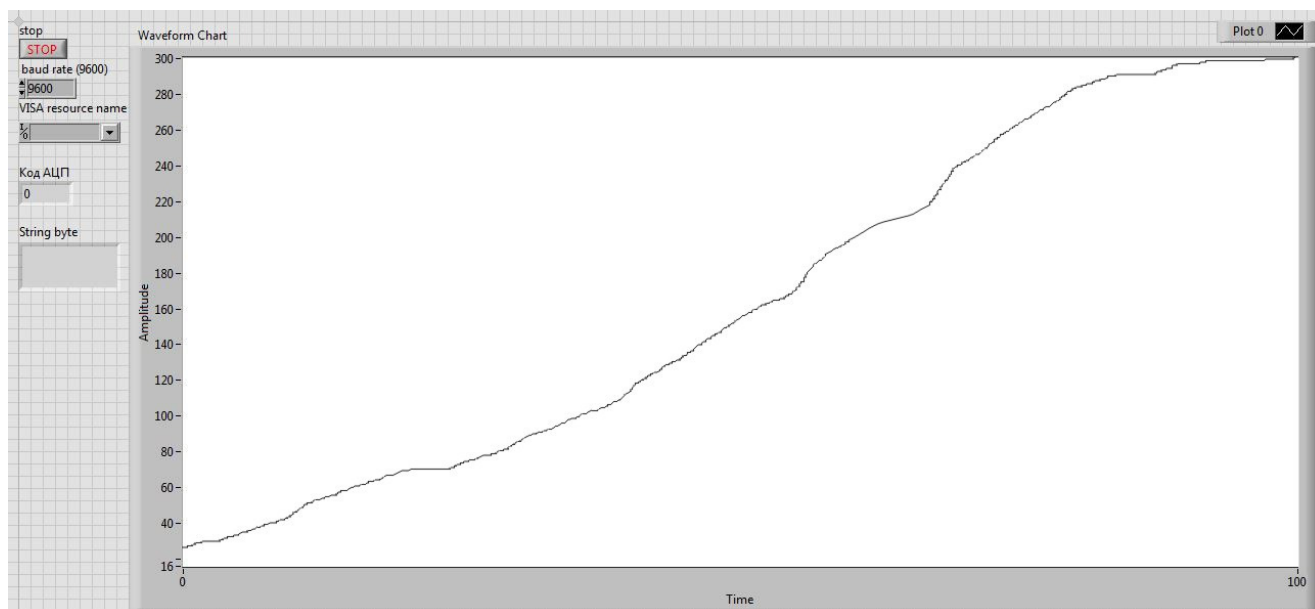


Рис. 12. Зависимость температуры от времени при нагреве до температуры 300°С

Результаты экспериментов соответствуют ожидаемым результатам, экструдер был нагрет до температуры 250°С за приблизительно 100 секунд.

В данной главе собран экспериментальный стенд для исследования работоспособности разработанного устройства. Разработана программа испытаний терморегулятора. На основе программы испытаний был проверен опытный образец экструдера с устройством управления. Исследования показали, что устройство удовлетворяет установленным требованиям: экструдер нагревается до температуры 300°С за 100 секунд, управляясь при этом из программы LinuxCNC.

Основные результаты работы

Проанализирован рынок нагревательных элементов, после чего выбран нагревательный элемент – нихромовая проволока и рассчитаны ее основные параметры: диаметр и длина.

Проанализирован рынок датчиков температуры и подобран удовлетворяющий условиям задания датчик – термометр сопротивления.

С учетом результатов исследований была разработана принципиальная электрическая схема устройства, по которой затем разработана печатная плата и собран рабочий экземпляр электронной ячейки.

Проведены исследования программы LinuxCNC. По результатам исследования написаны скрипты, необходимые для интеграции разработанного устройства управления с программой для управления станками с ЧПУ LinuxCNC. Написаны скрипты, изменяющий интерфейс пользователя и отображающие дополнительную панель с параметрами экструдера: текущей температурой экструдера и заданной температурой экструдера, а также кнопки включения и выключения терморегулятора.

В результате разработанный комплекс был встроен в реальный прототип многофункционального фабриката, где он показал свою полную работоспособность.

Список литературы

1. The Shape Deposition Manufacturing Process. Режим доступа: <http://www.cs.cmu.edu/~sdm/methodolgy.htm> (дата обращения: 26.06.2013).
2. Нагреватели. Методика и примеры расчета. Статья. Таблица 1 – Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.metotech.ru/art_nagrev_1.htm (дата обращения: 26.06.2013).
3. Нагреватели. Методика и примеры расчета. Статья. Таблица 2 – Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.metotech.ru/art_nagrev_1.htm. (дата обращения: 26.06.2013).
4. Термометры сопротивления: от теории к практике – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.symmetron.ru/articles/resistance-thermometers.pdf>. (дата обращения: 26.06.2013).
5. Знакомимся с LabView. Режим доступа: <http://easyelectronics.ru/znakomimsya-s-labview.html>. (дата обращения: 26.06.2013).
6. Билибин К.И., Власов А.И., Журавлева Л.В. и др. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств. /под общ. редакцией Шахнова В.А. - М.: Изд-во

МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002. 500 с. (серия: Информатика в техническом университете).

7. Агеева Т.И., Афонин А.И., Власов А.И. и др. Информационные технологии в инженерном образовании/под ред. Коршунова С.В., Гузненкова В.Н. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2007. – 432 с.: ил.
8. Нестеров Ю.И., Власов А.И., Першин Б.Н. Виртуальный измерительный комплекс// Датчики и системы. – 2000. - №4. - С.12-22.