

Лепехина С. Ю., Сухоруков С. И., Давыдов Ю. А.
S. Yu. Lepekhina, S. I. Sukhorukov, Yu. A. Davydov

**КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ТРЁХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ**

**ALGORITHM SET FOR THE OPERATION OF THE CONTROL SYSTEM OF A ROBOTIC
THREE-DIMENSIONAL PRINTING COMPLEX**

Лепехина Светлана Юрьевна – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: el.chep@bk.ru.
Svetlana Yu. Lepekhina – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: el.chep@bk.ru.

Сухоруков Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sukhorukov@knastu.ru.
Sergei I. Sukhorukov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: sukhorukov@knastu.ru.

Давыдов Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); Россия, 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47; тел. 8(4212)407-076. E-mail: Lab@festu.khv.ru.
Yuri A. Davydov – Dr. Sc., Professor, Railway Transport Department, Far Eastern State University of Railway Transport (Russia, Khabarovsk); house 47, Seryshev Street, Khabarovsk, 680021, Russia. E-mail: Lab@festu.khv.ru.

Аннотация. В данной статье разработан комплекс алгоритмов работы системы управления, применяемой в рамках разрабатываемого роботизированного комплекса трёхмерной печати. Проанализированы варианты возможных структур роботизированного комплекса. Выбрана структура для дальнейшей реализации. Проанализированы функциональное назначение и возможности входящих в комплекс управляющих устройств. Разработана структура алгоритмов управления роботизированного комплекса. Разработаны блок-схемы алгоритмов, реализуемых на отдельных устройствах, входящих в состав роботизированного комплекса.

Summary. In this article, a set of algorithms for the operation of the control system used within the framework of the developed robotic complex of three-dimensional printing is developed. Variants of possible structures of the robotic complex are analyzed. A structure has been selected for further implementation. The functional purpose and capabilities of the control devices included in the complex are analyzed. The structure of the control algorithms of the robotic complex has been developed. Block diagrams of algorithms have been developed, implemented on separate devices that are part of the robotic complex.

Ключевые слова: роботизированный комплекс, система управления, алгоритм управления, трёхмерная печать.

Key words: robotic complex, control system, control algorithm, 3D printing.

Исследование выполнено в рамках научного проекта, финансируемого за счёт средств КнАГУ № ВН009/2021.

УДК 681.5

Введение. На сегодняшний день в промышленности активно внедряются аддитивные технологии. Это связано с тем, что аддитивные технологии позволяют осуществлять быстрое прототипирование новой продукции, а также изготавливать изделия сложной пространственной конфигурации из различных материалов (преимущественно из различных пластиков и полимеров) [1; 2].

Основными преимуществами трёхмерной печати являются значительная экономия сырья, связанная с использованием только необходимого количества материала, возможность изготовления сложных конструкций, высокая скорость наладки и запуска процесса производства новой продукции и мобильность производства, осуществляемая за счёт возможности в кратчайшие сроки запускать производство новой продукции [3]. Однако, несмотря на все преимущества, присутствует ряд проблем, препятствующих широкому промышленному применению таких технологий. Одной из проблем, мешающих внедрению аддитивных технологий в промышленность, являются малые габариты зоны печати существующих 3D-принтеров [4]. Аддитивные технологии выгодны для мелкосерийного и гибкого производства, однако потребности промышленности в размерах печатаемых изделий зачастую превышают возможности готовых систем трёхмерной печати. Кроме того, применение классической трёхкоординатной механики для перемещения печатающей головы составляет дополнительные сложности при печати [5; 6].

Одним из вариантов решения вышеперечисленных проблем является смена типа механики на более сложные системы, такие как, например, промышленные роботы-манипуляторы. При разработке и внедрении таких систем, в отличие от классических 3D-принтеров, возникает ряд проблем, связанных с обеспечением совместного функционирования разнородного оборудования в составе технологического комплекса. Это обусловлено применением робота-манипулятора в качестве некоторой завершённой самостоятельной единицы с собственной системой управления, которую необходимо интегрировать в общую систему управления комплексом. Кроме того, необходимость обеспечения корректной работы системы с большой рабочей зоной печати приводит к построению отдельных локальных подсистем для управления элементами робототехнического комплекса [7; 8; 9].

В рамках данной статьи разработаны алгоритмы работы системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати пластиковых изделий, учитывающие состав и особенности функционирования элементов системы и реализуемые в рамках отдельных локальных подсистем управления входящего в комплекс оборудования.

Варианты структур роботизированных комплексов трёхмерной печати. В ходе ранее проведённых исследований [10; 11] были проанализированы основные технологические требования к процессу печати пластика и предложены варианты возможных структур роботизированных комплексов трёхмерной печати, отличающиеся различной иерархией оборудования в составе комплекса.

В первом варианте структуры главным устройством является контроллер робота, на который загружается управляющая программа в виде единого файла. Контроллер робота распознаёт команды и заданные параметры печати и передаёт их через интерфейс передачи данных на подчинённые контроллеры локальных подсистем управления элементами комплекса. Далее системы управления, получив команды и параметры, отработывают заложенные в них рабочие программы: система нагрева и охлаждения поддерживает температуру на сегментах термостола и экструдера с использованием сигналов от встроенных в них датчиков; система подачи пластика управляет механизмом подачи пластика (обеспечивает необходимую скорость и величину подачи пластика).

В соответствии с описанной структурой был реализован экспериментальный образец роботизированного комплекса и осуществлена серия экспериментальных запусков системы.

Во время пробных запусков этого комплекса были выявлены проблемы, связанные с недостаточным быстродействием системы управления и значительными временными задержками при передаче команд между различными элементами системы, что негативно повлияло на качество напечатанной детали.

Второй вариант структуры (см. рис. 1) предполагает подчинённую роль контроллера робота в системе управления – общее управление роботизированным комплексом при этом осуществляет некоторый центральный компьютер, или ПЛК.

При такой структуре контроллер робота только получает команды от центрального ПЛК и выполняет необходимые перемещения. Центральный ПЛК при этом осуществляет построение

чтение файла программы, анализ текущей команды, формирование и передачу управляющих команд для локальных подсистем, осуществляющих управление отдельными элементами системы.

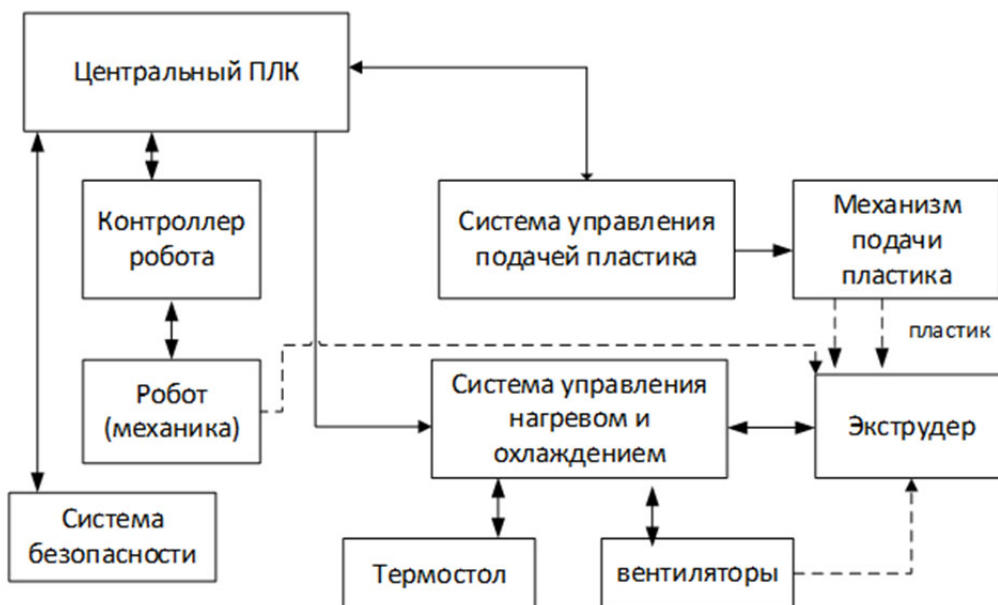


Рис. 1. Функциональная схема автоматизированного комплекса с ведомым контроллером робота

Такой подход позволяет повысить общее быстродействие всей системы за счёт обработки файла с программой на отдельном процессоре, а также за счёт возможности применения более быстродействующих интерфейсов для передачи команд между контроллерами и подсистемами. Кроме того, за счёт применения отдельного ПЛК должно в значительной степени упроститься решение вопросов синхронизации отдельных подсистем комплекса между собой.

В рамках данной статьи будет описан комплекс алгоритмов работы системы управления именно для второго варианта структуры комплекса.

Анализ структуры комплекса алгоритмов. В рамках вышеописанной структуры роботизированного комплекса необходима реализация целого ряда взаимосвязанных алгоритмов, исполняемых на различном оборудовании. Проанализируем отдельные устройства, на которых реализуются алгоритмы, и возможности по их построению.

Структура управляющих устройств приведена на рис. 2.

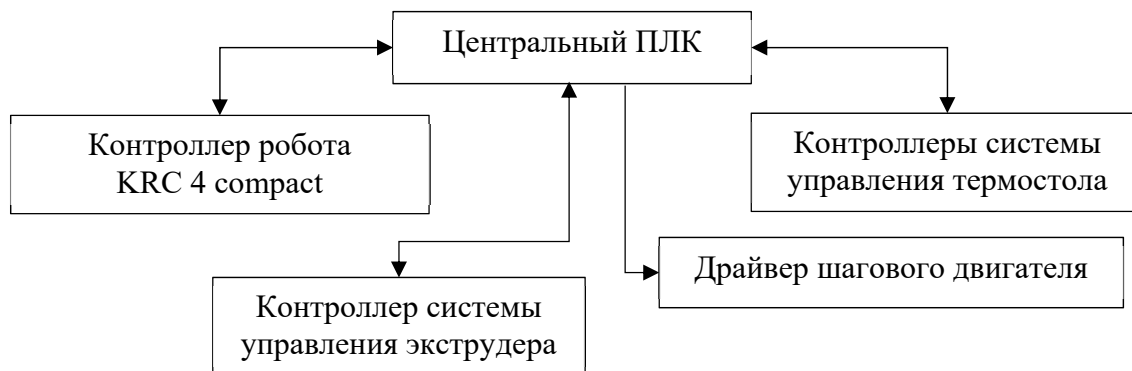


Рис. 2. Схема взаимодействия управляющих устройств системы

Для обработки команд перемещения используется контроллер робота KRC 4 compact, обмен данными с которым осуществляется с помощью программного пакета mxAutomation. Данный

программный пакет способен работать с промышленными ПЛК, такими как Siemens, а также микрокомпьютерами на базе операционной системы Windows. В связи с тем, что библиотека, необходимая для обеспечения обмена информацией между внешним ПЛК и контроллером робота, функционирует только под Windows и не может быть напрямую использована в системах типа Linux, выбор пал на микрокомпьютер, поддерживающий ОС Windows IoT, а именно Raspberry Pi 4. Именно на данном микрокомпьютере будет реализован основной алгоритм управления комплексом.

Кроме промышленного робота, в системе предусмотрены многосегментный нагревательный стол [10], подсистема контроля нагрева экструдера, а также механизм подачи пластика. Термостол и экструдер управляются отдельными микроконтроллерами, для которых необходима разработка алгоритмов. Механизм подачи пластика приводится в действие шаговым двигателем, управляемым через специализированный драйвер. При этом драйвер функционирует по заранее заложенным алгоритмам, реализованным производителем, поэтому разработка алгоритмов работы драйвера не требуется. Разработаем алгоритмы для вышеописанных устройств.

Алгоритм работы управляющей программы роботизированного комплекса. Для осуществления печати некоторого изделия необходимо на микрокомпьютере осуществлять построчное чтение и интерпретацию команд из управляющего кода с последующим их исполнением или отправкой на соответствующие исполнительные устройства. На сегодняшний день стандартом формирования управляющего кода для реализации задач печати является G-код, получаемый через специальную программу – слайсер [12; 13].

Для построчного чтения файла с G-кодом необходимы определение типа команды и последующий вызов необходимого метода. В рамках данной работы рассматриваются команды установки температуры экструдера, установки температуры нагревательного стола, задания параметров работы элементов системы.

К основным командам G-кода относятся:

1. M109 Snnn – установить температуру экструдера и ждать.
2. M190 – установить температуру стола и ждать.
3. G28 – перемещение в начало («домой»).
4. G0 (G1) Xnnn Ynnn Znnn Ennn Fnnn – перемещение.

В подпрограмме команды M109 происходит объявление переменной заданной температуры, после чего по протоколу I2C на модуль управления нагревом экструдера передаётся сигнал о начале нагрева и значение переменной заданной температуры. Далее ожидается ответный сигнал о завершении нагрева.

В подпрограмме команды M190 происходит объявление переменной заданной температуры, после чего по протоколу I2C на модуль управления нагревом стола передаётся сигнал о начале нагрева и значение переменной заданной температуры. Далее ожидается ответный сигнал о завершении нагрева.

Команда G28 означает перемещение робота в позицию Home, т. е. на позицию: $A1 = 0$, $A2 = -90$, $A3 = 90$, $A4 = 0$, $A5 = 0$, $A6 = 0$. Для реализации данной команды применима функция библиотеки команд `_mxAKrcReadactualaxisposition`. Она вычисляет текущее положение оси робота.

Для перемещения в пространстве (G0) необходимы координаты X, Y, Z.

По декартовой системе координат положение $X = 0$ $Y = 0$ $Z = 0$ находится в углу нагревательного стола.

В соответствии с данными командами и их принципом действия был разработан алгоритм программы, исполняющейся на центральном микрокомпьютере и осуществляющей чтение и интерпретацию G-кода. Блок-схема алгоритма программы чтения G-кода изображена на рис. 3.

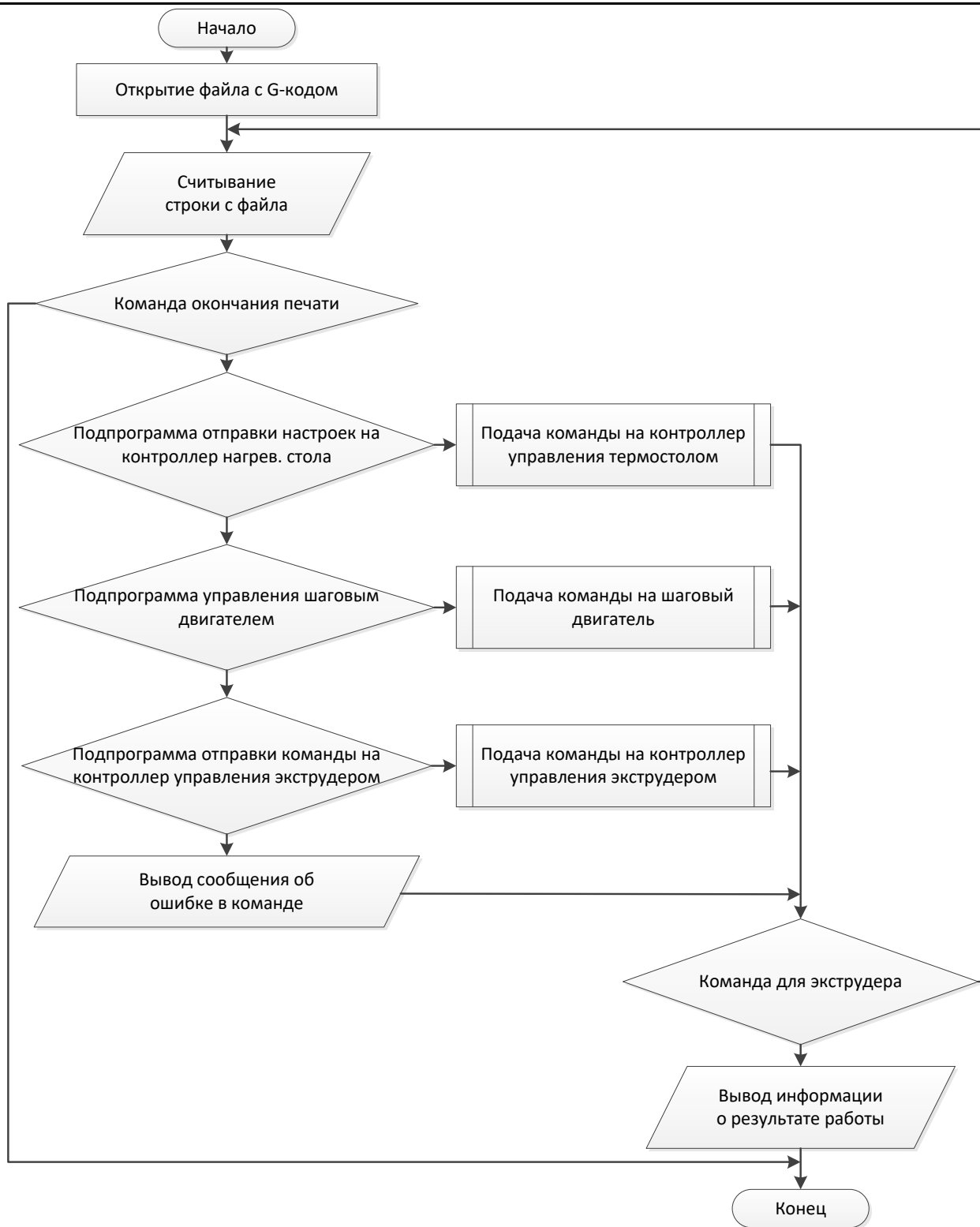


Рис. 3. Блок-схема алгоритма программы чтения G-кода

Кроме команд перемещения и контроля температуры, необходимо осуществлять выдачу пластика, для данной цели решено использовать шаговый двигатель. Блок-схема работы шагового двигателя представлена на рис. 4.

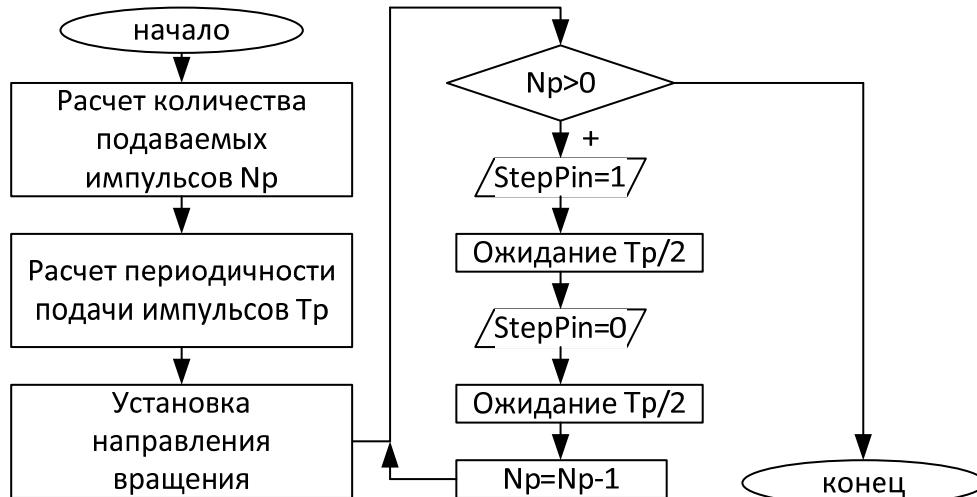


Рис. 4. Блок-схема управления шаговым двигателем

Алгоритм работы управляющей программы нагревательного стола. Управление нагревательным столом осуществляется путём передачи данных по протоколу I2C. Команды последовательно передаются по шине от первой до крайней секции, обратно сигналы передаются также последовательно.

В начале программы каждый микроконтроллер (Atmega 328-PU) получает своё значение T_z (заданная температура нагрева стола) от микрокомпьютера Raspberry через контакты шины ввода-вывода, далее подаёт сигнал логической единицы на транзистор, коммутирующий нагревательный элемент к силовому питанию 12 В для начала нагрева.

Микроконтроллер считывает сигнал с датчика температуры каждые 0.1 с. Далее идёт сравнение температуры T_d , полученной от датчика, и температуры T_z , заданной в текущей программе.

Если $T_d < T_z$, то выводится значение 0 и нагрев продолжается. Если $T_d \geq T_z$, то выводится значение 1 и напряжение перестаёт поступать на mosfet, он закрывается и нагрев прекращается.

При достижении необходимой температуры микроконтроллер считывает сигнал (0 или 1 с предыдущего сегмента) и сравнивает через логическое И со своим значением. Процесс нагрева продолжится до тех пор, пока все модули не дадут единицу на выходе, после чего сигнал о достижении необходимого диапазона температур будет отправлен на внешний контроллер.

В случае если в качестве задания на нагрев была получена нулевая величина, микроконтроллер не осуществляет включение нагрева, вместо этого генерируется сообщение на МК «Нагрев отсутствует» и загорается светодиод. Алгоритм работы программы описан в блок-схеме (см. рис. 5).

Алгоритм работы управляющей программы экструдера. Управление экструдером осуществляется аналогично управлению нагревательным столом. Различие заключается в том, что появляется необходимость управлять вентиляторами, охлаждающими радиатор с термобарьером и изготавливаемую деталь.

Для управления вентиляторами применяются mosfet-транзисторы, открывающиеся при заданных условиях. Работа вентилятора охлаждения радиатора зависит от значения датчика нагрева на экструдере, в то время как скорость вращения вентилятора обдува детали управляется посредством ШИМ.

В начале программы микроконтроллер получает своё значение заданной температуры от управляющего компьютера через протокол передачи данных I2C, после чего проводится сравнение температуры, полученной от датчика, и температуры, заданной в текущей программе.

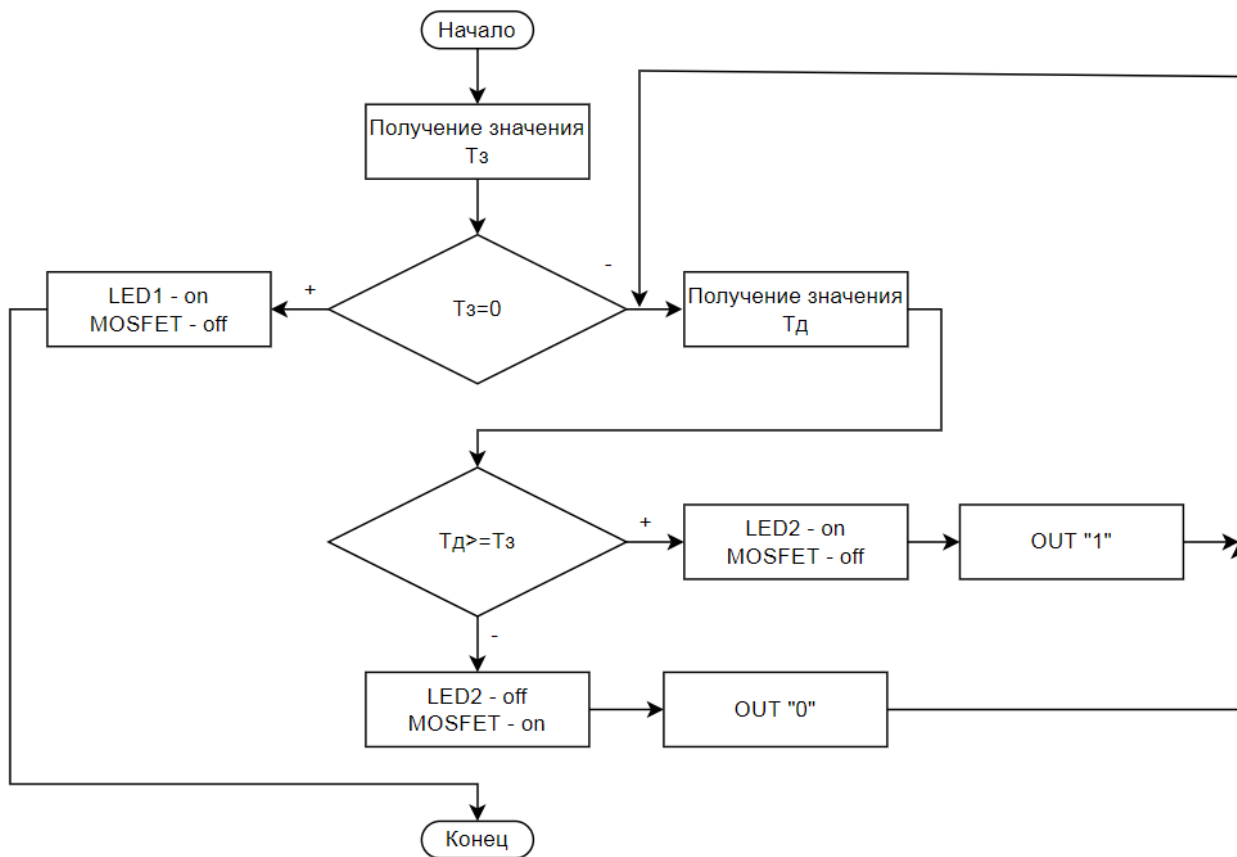


Рис. 5. Алгоритм работы программы нагревательного стола

Практическое применение разработанных алгоритмов системы управления в дальнейшем предполагается в рамках НИОКТР по проектированию и отладке роботизированных комплексов трёхмерной печати, а также возможно применение при построении систем крупногабаритной печати на основе классической механики.

В рамках данной научной работы разработан комплекс алгоритмов работы системы управления, применяемой в рамках разрабатываемого роботизированного комплекса трёхмерной печати. Проанализированы варианты возможных структур роботизированного комплекса. Выбрана структура для дальнейшей реализации в рамках научного проекта. Проанализированы функциональное назначение и возможности входящих в комплекс управляющих устройств. Разработана структура алгоритмов управления роботизированного комплекса. Разработаны блок-схемы алгоритмов, реализуемых на отдельных устройствах, входящих в состав роботизированного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрова, А. М. Автоматическое управление: учеб. пособие / А. М. Петрова. – Москва: Форум, 2010. – 240 с.
2. Белов, М. П. Технические средства автоматизации и управления / М. П. Белов. – Санкт-Петербург: СЗТУ, 2006. – 184 с.
3. Пронин, А. И. Теория автоматического управления: учеб. пособие / А. И. Пронин, Е. Б. Щелкунов. – 2-е изд., доп. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – 108 с.
4. Лысыч, М. Н. Области применения технологий 3D-печати / М. Н. Лысыч, М. Л. Шабанов, В. В. Романов // Современные наукоёмкие технологии. – 2014. – № 12 (Ч. 2). – С. 165-169.
5. Лысыч, М. Н. Обзор современных технологий 3D-печати / М. Н. Лысыч, М. Л. Шабанов, А. А. Качурин // Современные наукоёмкие технологии. – 2015. – № 6. – С. 26-30.
6. Шкуро, А. Е. Технологии и материалы 3D-печати: учеб. пособие / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов. – Екатеринбург: ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2017. – 101 с.

7. Козырев, Ю. Г. Промышленные роботы / Ю. Г. Козырев. – Москва: Машиностроение, 1988. – 392 с.
8. Юрьевич, Е. И. Управление роботами и робототехническими системами / Е. И. Юрьевич. – Санкт-Петербург: Мир, 2000. – 348 с.
9. Безопасность промышленных роботов: документация: разработчик KUKA Roboter GmbH. – Augsburg, 2016. – 39 с.
10. Лепехина, С. Ю. Разработка системы управления унифицированного модуля нагревательного стола для роботизированного комплекса трёхмерной печати / С. Ю. Лепехина, Г. А. Громыко, С. И. Сухоруков // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы IV Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11-15 апреля 2022 года. В 4 ч. Ч. 1 / Редколлегия: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 35-37.
11. Овсянников, А. Р. Анализ возможностей применения миникомпьютеров для построения систем управления роботизированными комплексами / А. Р. Овсянников, С. Ю. Лепехина, С. И. Сухоруков // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы V Международной научно-практической конференции // Редколлегия: С. И. Сухоруков (отв. ред.), А. С. Гудим, Н. Н. Любушкина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 63-67.
12. KUKA System Technology: документация / KUKA Roboter GmbH. – Augsburg, 2016. – 107 с.
13. KR C4 compact: инструкция по эксплуатации / KUKA Roboter GmbH. – Augsburg, 2016. – 141 с.