
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК.: 681.171.074:004.356.2

УПРАВЛЕНИЕ ШАГОВЫМ ПРИВОДОМ 3D-ПРИНТЕРА: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Статья поступила в редакцию 20.10.2015, в окончательном варианте 02.03.2016.

Батырканов Жениш Исакунович, доктор технических наук, профессор, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Мира, 66, e-mail: bjenish@mail.ru

Кадыркулова Кыял Кудайбердиевна, старший преподаватель, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Мира, 66, e-mail: kyial_02@mail.ru

Белялов Шайбек Асланбекович, аспирант, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Мира, 66, e-mail: shaibek.90@mail.ru

Рассматривается и решается задача построения алгоритмов управления по осуществлению движения рабочих органов 3D-принтера по предписанной пространственной траектории. В силу распространенности шаговых приводов (ШП) в 3D-принтерах рассматривается методика синтеза алгоритмов управления для приводов с шаговыми двигателями (ШД). Предписанная траектория в этой работе задается табличным способом – на основе указания проходимых последовательно контрольных точек, нанесенных на пространственные модели изготавливаемых деталей. При этом очевидно, что чем больше берется контрольных точек, тем с большей точностью будет воспроизводиться форма детали на 3D-принтере. В работе предложена оригинальная математическая модель ШП как объекта управления. На основе этой модели и таблицы предписанных движений определяется алгоритм управления ШД. Рассмотрены вопросы технической реализации синтезированных алгоритмов управлений, приведены структурно-функциональные схемы и принципиальные электрические схемы для рассматриваемых функциональных элементов. Рассмотрены также вопросы погрешности позиционирования ШД, выбора его угловой скорости.

Ключевые слова: 3D-принтер, шаговый двигатель, шаговый привод, предписанная пространственная траектория, управление движением, единичный шаг, драйвер, число фаз

MANAGEMENT STEPPER OF 3D-PRINTER: MATHEMATICAL MODEL AND QUESTIONS OF TECHNICAL REALIZATION

Batyrcanov Zhenish I., D.Sc. (Engineering), Professor, Kyrgyz Technical University named after I. Razzakov, 66 Mir Ave., Bishkek, 720044, Kyrgyz Republic, e-mail: bjenish@mail.ru

Kadyrkulova Kyial K., Senior Lecturer, Kyrgyz Technical University named after I. Razzakov, 66 Mir Ave., Bishkek, 720044, Kyrgyz Republic, e-mail: kyial_02@mail.ru

Belialov Shaibek A., post-graduate student, Kyrgyz Technical University named after I. Razzakov, 66 Mir Ave., Bishkek, 720044, Kyrgyz Republic, e-mail: shaibek.90@mail.ru

We consider and resolved the problem of constructing the control algorithms to implement the movement of the workers of 3D-printer prescribed spatial trajectory. Due to the prevalence of stepper motors (SM) in 3D-printers, in article is reviewed the technique of algorithms synthesis for actuators control with SM. The prescribed trajectory in this work is given by the tabular method, on the basis of job control points applied to spatial models manufactured parts. It is obvious that the greater the number of reference points will be taken, the better will be reproduced form of detail at the 3D-printer. The paper presents original mathematical model of the SD as a controlled object. On the basis of the mathematical model and the table of prescribed movements is determined algorithm of SM control. Authors are reviewed technical realization questions of the synthesized control algorithm, given the structural and functional schemes and principal electrical schemes of functional elements. Also are analyzed the problems of SM positioning errors, as well as SD angular velocity choice questions.

Keywords: 3D-printer, stepper motor, stepper drive, prescribed spatial trajectory, movement control, single step, driver, number of phases

Введение. Использование устройств для быстрого прототипирования (известных как 3D-принтеры), позволяет превратить спроектированные в CAD-системах 3D-модели в реальные объекты. Такие устройства дают возможность получить прототип разработки в «вещественной форме» за небольшое время и с малыми затратами. Применение 3D-принтеров может сэкономить значительное количество времени и средств на этапе разработки по сравнению с использованием для создания прототипа специально изготовленной технологической оснастки, обработки на станках и пр. На данный момент сама RP-технология (*rapid prototyping*) развилась до такой степени, что прототипы по своим физическим свойствам приближаются к предметам (объектам), созданным при помощи традиционных технологий.

В силу особенностей RP-технологии сложность изготавливаемой детали также не играет большой роли. Даже при значительном изменении конструкций изготавливаемых деталей (изделий) их новые варианты можно достаточно быстро распечатать на 3D-принтере повторно. Это расширяет возможности выбора оптимальных проектных и дизайнерских решений [6] – за счет наглядного сравнения различных вариантов в вещественной форме.

В настоящее время RP-технология помимо использования в сфере дизайна популярна и среди рядовых пользователей (в основном, в качестве хобби), а также может использоваться для обучения в образовательных учреждениях. Последнее делает важным изучение принципов работы 3D-принтеров в теоретическом плане и приобретение студентами необходимых компетенций по их созданию и практическому использованию. Однако промышленно выпускаемые 3D-принтеры пока достаточно дороги, большинство их не совсем подходят для учебных целей.

Поэтому целями данной работы были следующие: анализ принципов работы 3D-принтеров и недостатков существующих аппаратно-программных решений – с позиций научных исследований и интересов учебного процесса; анализ существующих и разработка оригинальных методов управления движением «печатающей головки» 3D-принтеров; характеристика типичной конструкции прототипа 3D-принтера, которая может быть использована для учебных целей и выполнения некоторых экспериментальных исследований (в т.ч. учебно-исследовательского характера).

Общая характеристика функциональных возможностей 3D-принтеров. В типичных случаях 3D-принтеры способны создавать из электронных трехмерных моделей необходимую деталь методом послойного наплавления одного или нескольких видов расходных материалов. В качестве таких материалов обычно используются нити пластика типа PLA и ABS [6], подаваемые в печатающую головку из бухты. Устройство (3D-принтер) подключается к персональному компьютеру в качестве периферийного, получает и интерпретирует управляющие команды в виде G-кода. G-код – условное наименование языка программирования устройств с числовым программным управлением, определяет координаты точек по осям X, Y и Z. В настоящее время в России выпускаются 3D принтеры различных модификаций и типов. Кроме того, значительная номенклатура 3D принтеров импортируется из-за рубежа. Начали использоваться такие принтеры и в Кыргызской республике.

Для определенности укажем некоторые из моделей, используемых в Кыргызской республике (табл. 1).

Таблица 1

Некоторые примеры 3D-принтеров

Страна	Сайт	Модель
Россия	Printers3D.ru	ENGINEERV2, MENDEL
США	Solidoodle (http://store.solidoodle.com/index.php?route=common/home)	Solidoodle 3d printer, 3nd Generation
США	Invent part (http://www.inventapart.com/)	L5 3D printer
Германия	iRapid (http://www.irapid.de/)	iRapid Compact V2
США	Deezmaker (http://deezmaker.com/)	BUKobot 8Duo(Dual Extruder)

Во всех этих 3D-принтерах структура алгоритмов управления приводами и методика построения программного обеспечения (ПО) скрыта от пользователя (является коммерческим секретом производителя). Поэтому в некоторых случаях нет уверенности в полной корректности использова-

ния этих устройств для решения конкретных (частных) задач прототипирования деталей. Кроме того, в силу выпуска 3D-принтеров малыми партиями, их рыночные стоимости пока весьма высоки, что тормозит внедрение таких устройств в учебный процесс и научные исследования.

В связи с этим представляется весьма актуальной задача исследования различных аспектов разработки программ 3D-моделирования в увязке с вопросами синтеза алгоритмов управления приводами 3D-принтеров, а также технической реализации разработок без использования дорогостоящих заказных деталей.

В подавляющем числе случаев в 3D-принтерах применяются шаговые приводы (ШП). Поэтому в данной работе ставится и решается задача управления движением рабочего органа 3D-принтера по заданной (предписанной) пространственной траектории движения. В качестве рабочего органа в данной статье по умолчанию предполагается головка экструдера (печатающая головка) и платформа где происходит формообразование деталей.

Вопросы управления приводами подачи полимерной нити на экструдер 3D-принтера, управления температурным режимом экструдера, давлением в нем и другие технологические вопросы (решения) в данной работе не рассматриваются.

Методика синтеза управляющих законов для шаговых двигателей 3D-принтера. Результаты данной работы по синтезу управляющих алгоритмов для трех совместно используемых ШД, могут быть использованы в 3D-принтерах, упрощенная конструкция которых показана на рисунке 1.

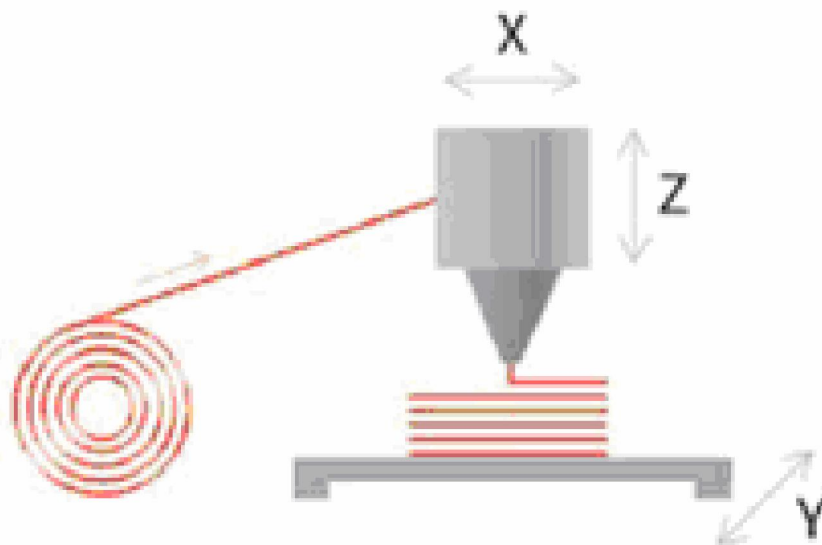


Рис. 1. Упрощенная конструкция 3D-принтера, использующего метод послойного наплавления (FDM)

Ниже детально рассматривается проблема синтеза законов управления ШД 3D-принтера, имеющая целью осуществление движения его рабочих органов по предписанным пространственным траекториям.

Прежде всего, приведем «базовую» информацию о ШД.

Для всех типов ШД с помощью электронного коммутатора вырабатываются импульсы напряжения, которые подаются на обмотки управления, расположенные на статоре ШД. При этом каждый импульс обеспечивает поворот ротора на определенный угол, зависящий от конструкции ШД. В настоящее время в сфере машиностроения наибольшее распространение получили высокомоментные двухфазные гибридные шаговые электродвигатели с угловым перемещением $1,8^\circ$ / шаг (200 шагов / оборот) или $0,9^\circ$ / шаг (400 шагов / оборот).

Закон поворота ротора ШД во времени определяется последовательностью, скважностью и частотой поступления на него управляющих импульсов, а также типом и конструктивными параметрами

ШД. Основными такими параметрами являются следующие: число фаз (количество обмоток управления и схема их соединения) – различают однофазные и многофазные двигатели; тип ШД – с активным или пассивным ротором; одиночный шаг ротора (угол поворота ротора при подаче единичного импульса); номинальное напряжение питания; номинальный вращающий момент и т.д. Управление ШД обеспечивается специальным электронным блоком управления.

В силу особенностей ШД для них вопросы «люфта» ротора [3] при вращении, являются не актуальными. Зато важна точность установки ротора в очередное заданное положение, скорость поворота (установки) ротора в это положение и пр. Недостаточная скорость установки ШД в процессе работы 3D-принтера может приводить к погрешностям воспроизведения формы (поверхности) детали.

Для синтеза законов управления рассмотрим ШД с зубчатым передаточным механизмом на валу двигателя. При помощи этого механизма вращательное движение ротора двигателя преобразуется в поступательное движение механизмов (в конечном счете – печатающей головки) 3D-принтера.

Пусть на роторном валу ШД посажено (установлено) зубчатое колесо (шестерня) с радиусом R и угловым расстоянием между двумя зубьями $\Delta\alpha$ градусов, т.е. угол поворота ротора ШД при действии единичного импульса составляет $\Delta\alpha$ градусов. В дальнейшем требуется представить $\Delta\alpha$ в радианах. Перевод из градусов в радианы осуществляется по формуле:

$$\Delta\alpha[\text{rad}] = \frac{3.14[\text{rad}](\Delta\alpha[\text{grad}])}{180[\text{grad}]} \quad (1)$$

При действии единичного импульса на ШД с посаженной на валу его ротора шестерней с радиусом R , одиночный угловой шаг поворота ротора преобразуется в поступательное движение шестерни на расстояние, равное:

$$L_{\text{ш}} = \Delta\alpha \cdot R, \quad (2)$$

где $\Delta\alpha$ – шаг поворота ротора ШД при подаче единичного импульса (градусы); $L_{\text{ш}}$ – величина линейного шага шестерни при действии одного импульса на ШД.

Так как в ШД шаги осуществляются в дискретные моменты времени, то математическая модель (ММ) ШД как объекта управления описывается с использованием конечно-разностного выражения:

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + n_k(\Delta\alpha), \quad (3)$$

где φ_k – текущее угловое положение ротора ШД на t_k -ом моменте времени; n_k – количество управляющих импульсов подаваемых на ШД за отрезок времени $[t_k, t_{k+1}]$; φ_{k+1} – угловое положение ротора ШД в t_{k+1} -ый момент времени.

Формула (3) используется тогда, когда требуемые перемещения рабочих органов 3D-принтера описаны в угловых координатах. Однако в большинстве случаев необходимые перемещения описываются в линейных координатах. При этом аналогично (3), предлагается следующая ММ управления движениями рабочих органов 3D-принтера.

$$\begin{cases} X_{k+1} = X_k + n_{kx} l_{\text{ш}x} \\ Y_{k+1} = Y_k + n_{ky} l_{\text{ш}y} \\ Z_{k+1} = Z_k + n_{kz} l_{\text{ш}z} \end{cases}, \quad (4)$$

где X_k, Y_k, Z_k – текущие координаты рабочих органов принтера по осям X, Y, Z в k -ый момент времени; $X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}$ – координаты рабочих органов по осям X, Y, Z в $(k+1)$ момент времени; n_{kx}, n_{ky}, n_{kz} – количества импульсов поданных на ШД приводов по осям X, Y, Z за указанный промежуток времени; $l_{\text{ш}x}, l_{\text{ш}y}, l_{\text{ш}z}$ – величины линейных шагов рабочего органа по осям X, Y, Z от действия одиночных импульсов на соответствующие ШД.

Отметим, что если количество подаваемых на ШД импульсов за «шаг по времени» для каждой оси движения печатающей головки разное, то для обеспечения лучшего воспроизведения формы детали необходимо решать задачу оптимизации распределения во времени импульсов, подаваемых на ШД с меньшей частотой (более редко).

Для ШД, как объекта управления, целесообразно использовать ММ (4), содержащую выражения, связывающие управляемые величины $X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}$ с управляющими n_{kx}, n_{ky}, n_{kz} . Подчеркнем, что эта ММ формально соответствует «независимому» управлению ШД по каждой из осей – вопросы «синхронизации» импульсов управления при разном их количестве за шаг по времени непосредственно в данной модели не учитываются.

Таким образом, в практическом плане задача управления ШД сводится к нахождению количества управляющих импульсов n_{kx}, n_{ky}, n_{kz} из формул (4) и подаче их на соответствующие ШД за отрезок времени $[t_k, t_{k+1}]$. При этом значения $X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1}$ берутся из таблицы предписанных (требуемых) контрольных точек пространственной траектории движения рабочих органов 3D-принтера (она может строиться в автоматическом или полуавтоматическом режиме на основе компьютерных моделей объектов).

Отметим, что в ряде случаев при планировании использования 3D-принтера приходится учитывать и инерционные характеристики ШД и рабочих органов, т.е. возможность корректной (полной) «отработки» ими всех поступивших импульсов управления за заданный промежуток времени.

Проиллюстрируем построение предписанной пространственной траектории движения рабочих органов 3D-принтера с помощью рисунка 1.

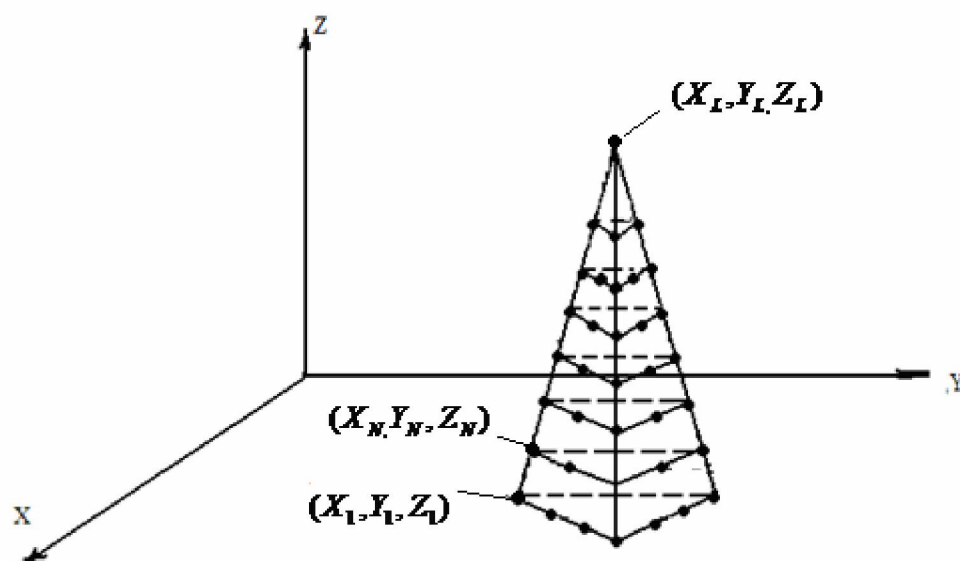


Рис. 1. Пространственная модель детали с нанесенными на нее контрольными точками

По требуемой пространственной модели объекта с нанесенными на нее контрольными точками строим таблицу для предписанной траектории движения рабочего органа 3D-принтера (табл. 2).

Таблица 2

Предписанные координаты в различных точках траектории

t_s	t_1	t_2	...	t_k	t_{k+1}	...	t_L	t_{L+1}
x_s	x_1	x_2	...	x_k	x_{k+1}	...	x_L	x_{L+1}
y_s	y_1	y_2	...	y_k	y_{k+1}	...	y_L	y_{L+1}
z_s	z_1	z_2	...	z_k	z_{k+1}	...	z_L	z_{L+1}

Начало движения печатающей головки осуществляется с момента t_1 и начального положения (X_1, Y_1, Z_1) . Затем выполняется переход в положение (X_2, Y_2, Z_2) , соответствующее моменту времени t_2 . Далее движение осуществляется аналогично и в конце первого цикла, соответствующего «первому слою» воспроизводимого объекта, печатающая головка приходит в начальное положение, т.е. (X_1, Y_1, Z_1) . Из этого положения осуществляется переход в положение (X_N, Y_N, Z_N) , и затем движение осуществляется по второму слою объекта, воспроизводимого 3-D принтером. Далее движение выполняется по 3-ему слою и т.д. Таким образом, слои могут наноситься последовательно, т.е. друг на друга. В конце работы осуществляется переход к конечному положению (X_L, Y_L, Z_L) .

Отметим, что подсчет количества необходимых импульсов по формулам (4) для обеспечения перемещений, задаваемых таблицей 1, может приводить к тому, что расчетное количество импульсов (для определенности – по «X – оси»):

$$n_k = (X_{k+1} - X_k) / l_{ш} \quad (5)$$

будет выражаться не целым числом. В этом случае берется ближайшее целое число (по стандартным правилам округления), а максимальная погрешность позиционирования ШД составит:

$$\varepsilon_{\max} = 0.5 l_{ш} . \quad (6)$$

Следовательно, чтобы уменьшить погрешность позиционирования ШД нужно уменьшить $l_{ш}$. А для этого, в свою очередь, нужно уменьшить величину единичного шага (поворота ротора) $\Delta\alpha$, которая достигается путем выбора ШД с необходимым количеством полюсов (в том числе – эквивалентных полюсов). Необходимая скорость движения ШД обеспечивается путем уменьшения или увеличения величины отрезка по времени $[t_k, t_{k+1}]$ – при фиксированных количествах импульсов, которые должны быть поданы на ШД за этот отрезок. Уменьшение отрезка по времени увеличивает скорость движения (перемещения) ШД и, как следствие, печатающей головки.

Техническая реализация системы управления шаговыми двигателями для прототипа 3D-принтера. Целесообразность самостоятельной разработки и создания прототипа 3D-принтера определяется следующими обстоятельствами: не все серийно выпускаемые 3D-принтеры подходят для решения конкретных научно-исследовательских задач – в т.ч. из-за «закрытости» программного обеспечения; рыночная стоимость имеющихся на рынке 3D-принтеров пока слишком высока для приобретения их с целью выполнения низкобюджетных исследовательских проектов, обеспечения учебного процесса и т.д.; сама по себе разработка таких устройств является полезной с точки зрения развития инженерных навыков у студентов и магистрантов, а также навыков их командной работы над проектами с разделением ролей.

Поэтому приведем технические решения для макета устройства, которое разработано авторами и используется на кафедре «Автоматического управления» КГТУ им. И. Раззакова для образовательных целей. Оно может рассматриваться как прототип 3D-принтера.

Для управления ШД используется компьютер (ПЭВМ), куда предварительно записывается информация о всех параметрах ШД; таблица предписанных движений рабочих органов 3D-принтера. В компьютере, на основе уравнений системы (4) и заданной величины отрезка по времени $[t_k, t_{k+1}]$ осуществляется подсчет необходимого количества управляющих импульсов для подачи на обмотки ШД в течение каждого временного отрезка.

Подчеркнем, что приводимое ниже описание является типовым техническим решением, которое может модифицироваться в рамках конкретных разработок, в т.ч. и студенческих.

Структурно-функциональная схема системы управления ШД показана на рисунке 2. Она включает такие объекты: порт LPT (в силу традиционности использования LPT порта для передачи управляющих импульсов на устройство управления и простоты соответствующих схмотехнических решений); шин данных и управления; контроллера; трех электронных драйверов и самих ШД.

От компьютера по интерфейсу LPT приходят сигналы по первым четырем шинам данных для управления обмотками двигателя ШД; по следующим трем шинам передаются управляющие сигналы выбора ШД. Эти сигналы поступают на контроллер. В нем происходит выбор двигателя, который

должен работать в конкретный момент времени – путем подачи сигнала выборки на соответствующий канал ШД. Затем импульсы управления подаются в электронный драйвер. В нем они усиливаются по току и напряжению. В конечном итоге эти преобразованные импульсы передаются на обмотки соответствующих ШД, которые и обеспечивают непосредственное управление режимами работы двигателей.

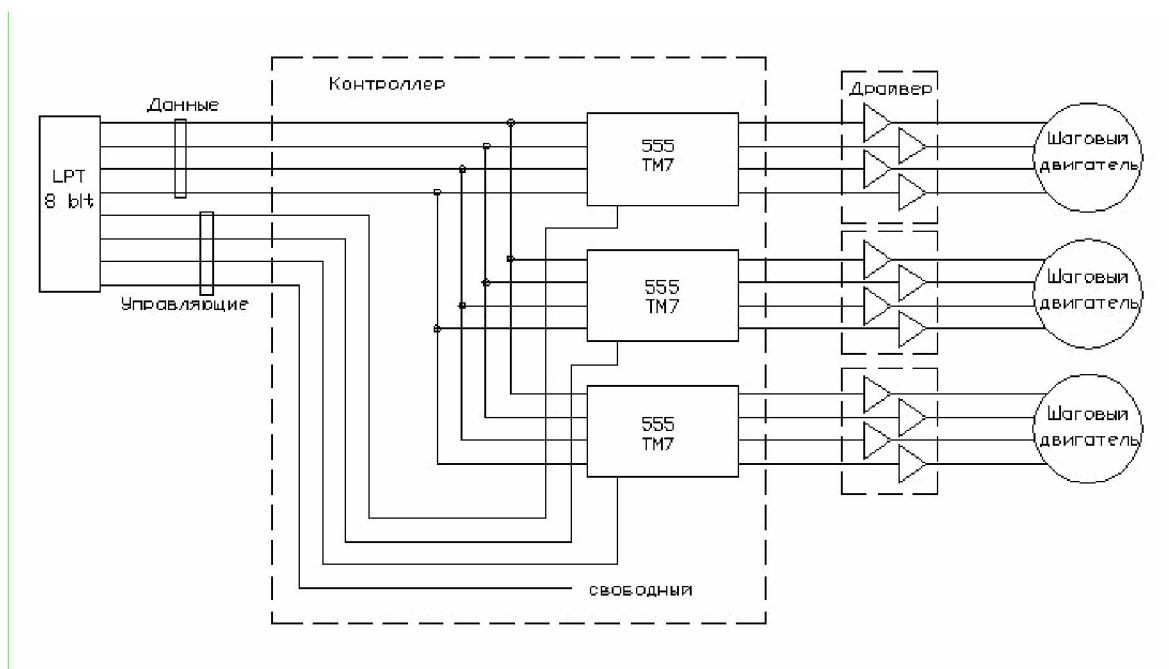


Рис. 2. Структурно-функциональная схема типичной системы управления ШД

Электрическая схема контроллера показана на рисунке 3. Контроллер управления ШД собран на трех микросхемах серии 555TM7 (достаточно распространенное изделие, включенное в базы элементов многих систем автоматизированного проектирования) и не требует прошивки. В каждой микросхеме находятся четыре D-триггера с режимом защелки. При приходе управляющих сигналов на входы D1–D4 они записываются в триггеры, но передаются на выходы микросхем Q1–Q4 только при приходе импульса на входы защелки E112 и E134. Таким образом, можно управлять выбором драйвера ШД, который должен включиться в конкретный момент времени.

Отметим, что в настоящее время с использованием современных микропроцессоров возможны и иные схемотехнические решения.

Драйвер шагового двигателя. Для описываемой конструкции он представляет собой четырехканальный усилитель или четыре ключа (рис. 4). Драйвер собран на четырех транзисторах КТ 972 (также достаточно распространенное изделие). При поступлении положительного импульса на базу транзистора происходит его открытие, при этом осуществляется подача напряжения на обмотку двигателя. Диоды необходимы для гашения ЭДС самоиндукции, возникающих в обмотках, а параллельный фильтр (состоящий из резистора и конденсатора) служит для «отсечения» высокочастотных составляющих. Схема питается от источника постоянного напряжения 12 Вольт.

В качестве языка программирования для создания программы, обеспечивающей управление работой макета, был выбран язык Паскаль в среде Delphi 7. С использованием этого языка была разработана специальная программа, насчитывающая примерно 600 строк кода и предназначенная для использования на управляющей ПЭВМ. Тип применяемой операционной системы не критичен. Особенностью использования программы является то, что она работает в реальном масштабе времени. При этом исполнение строк кода программы параллельно отрабатывается макетом 3D-принтера.

Подчеркнем, что авторы настоящей статьи не ставили себе целью разработки прототипа устройства, предназначенного для серийного промышленного выпуска. Поэтому описанная конструкция

должна рассматриваться как некоторая базовая, которая в дальнейшем может модифицироваться в тех или иных направлениях – в т.ч. и в рамках учебного процесса.

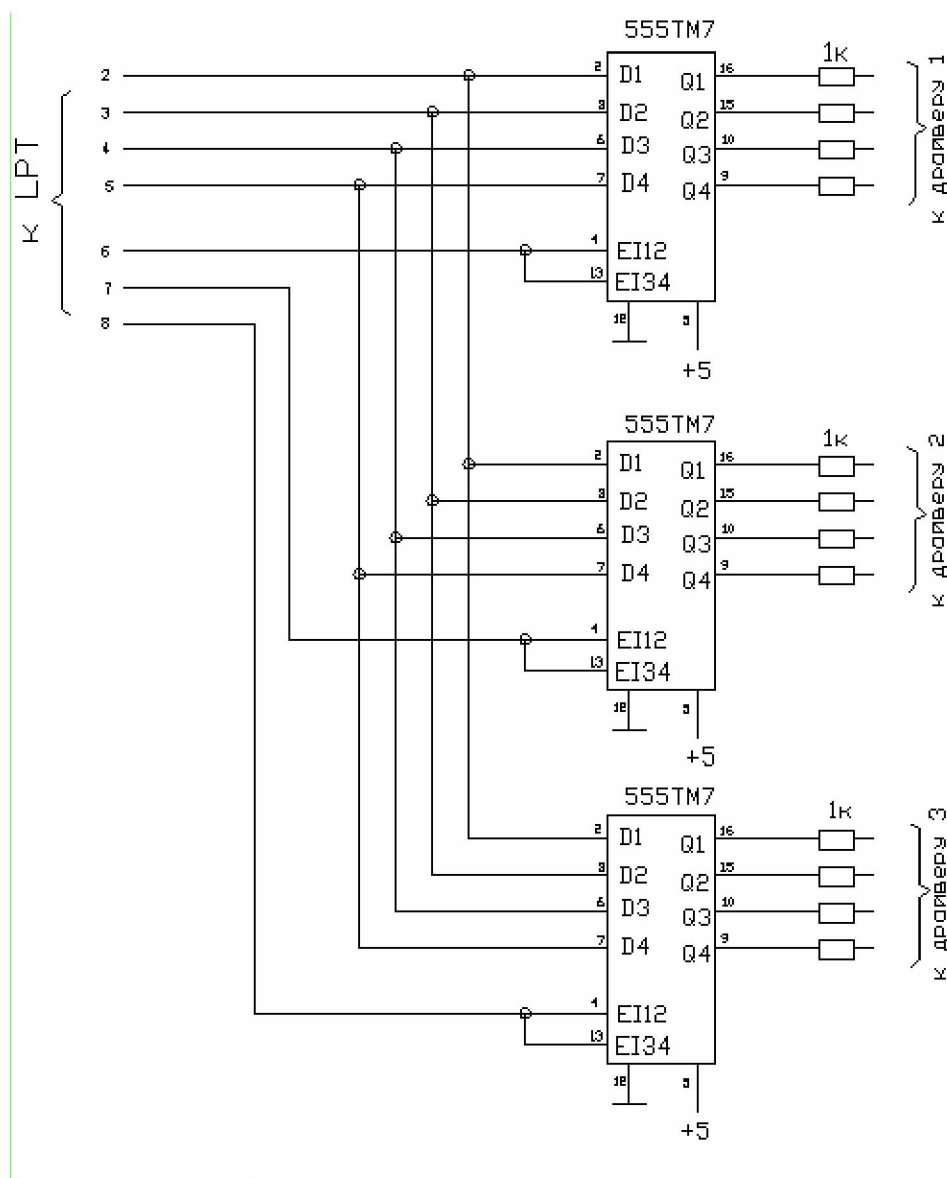


Рис. 3. Типичная электрическая схема контроллера, используемого для управления ШД

На рисунках 5 и 6 показаны части разработанного макета, для изготовления которого были использованы части снятых с эксплуатации матричных принтеров. Возможность использования таких деталей особенно важна для вузов, т.к. они обычно не располагают парком станочного оборудования, необходимого для изготовления всех необходимых узлов и блоков, а их заказ во внешних организациях требует значительных затрат.

На фото хорошо видны пары параллельных направляющих штанг, предназначенных для обеспечения перемещения печатающей головки вдоль осей «X» и «Y». При увеличении размеров этих направляющих возникают вопросы, связанные с обеспечением их параллельности, жесткости и т.д. Поэтому в данном прототипе (как впрочем, и в большинстве серийно выпускаемых 3D-принтеров) размеры этих штанг ограничены.

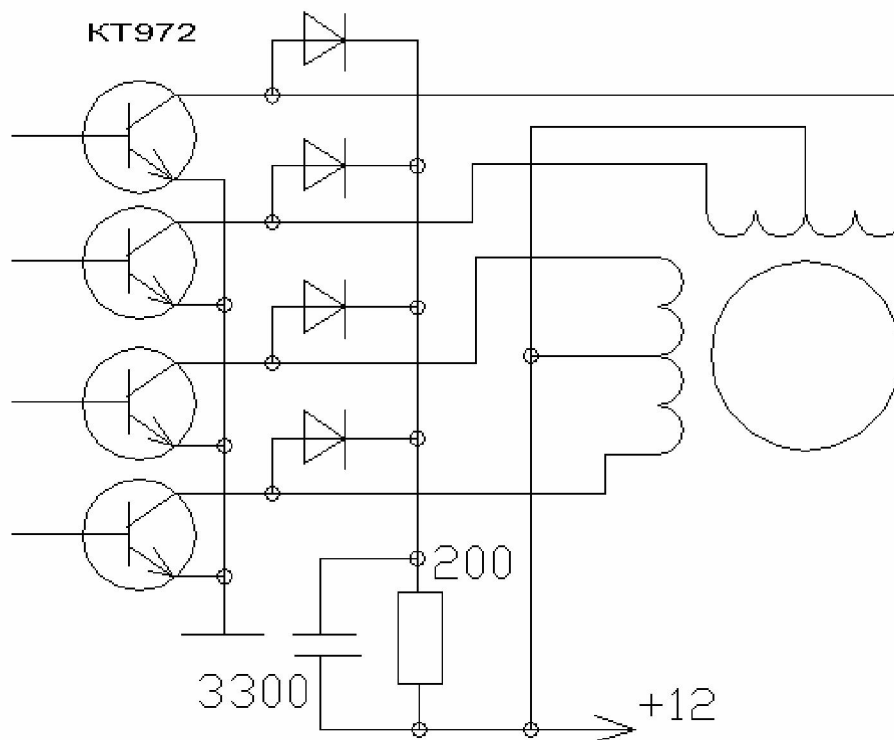


Рис. 4. Типичная электрическая схема драйвера ШД

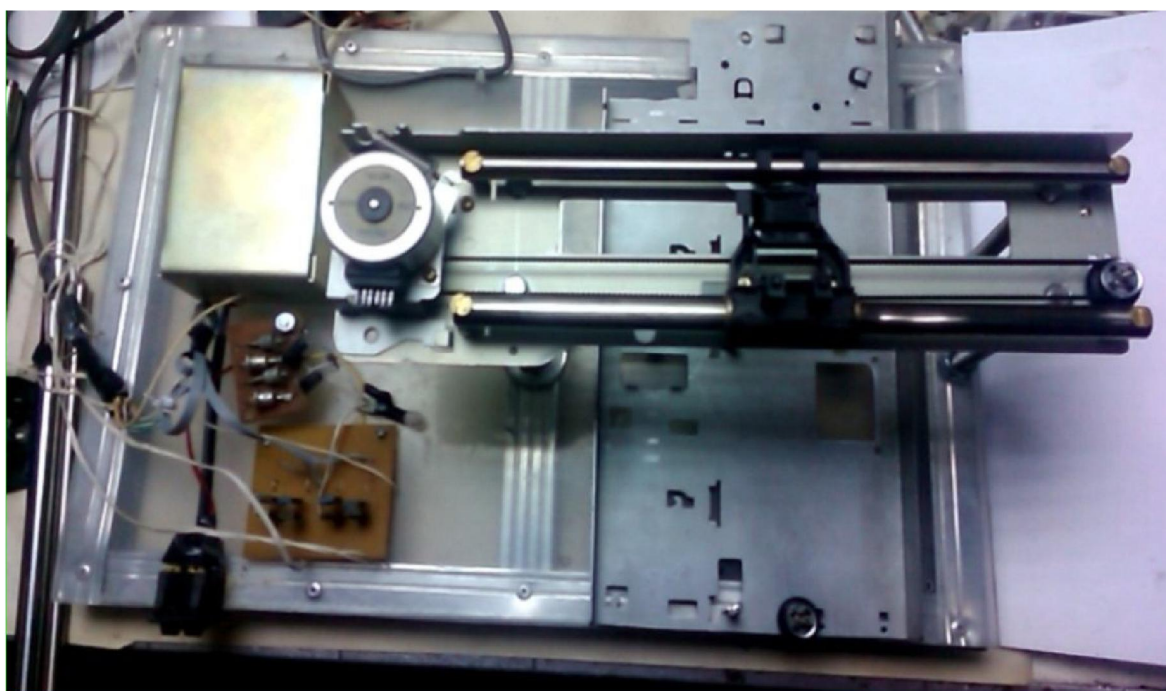


Рис. 5. Вид верхней части макета 3D-принтера

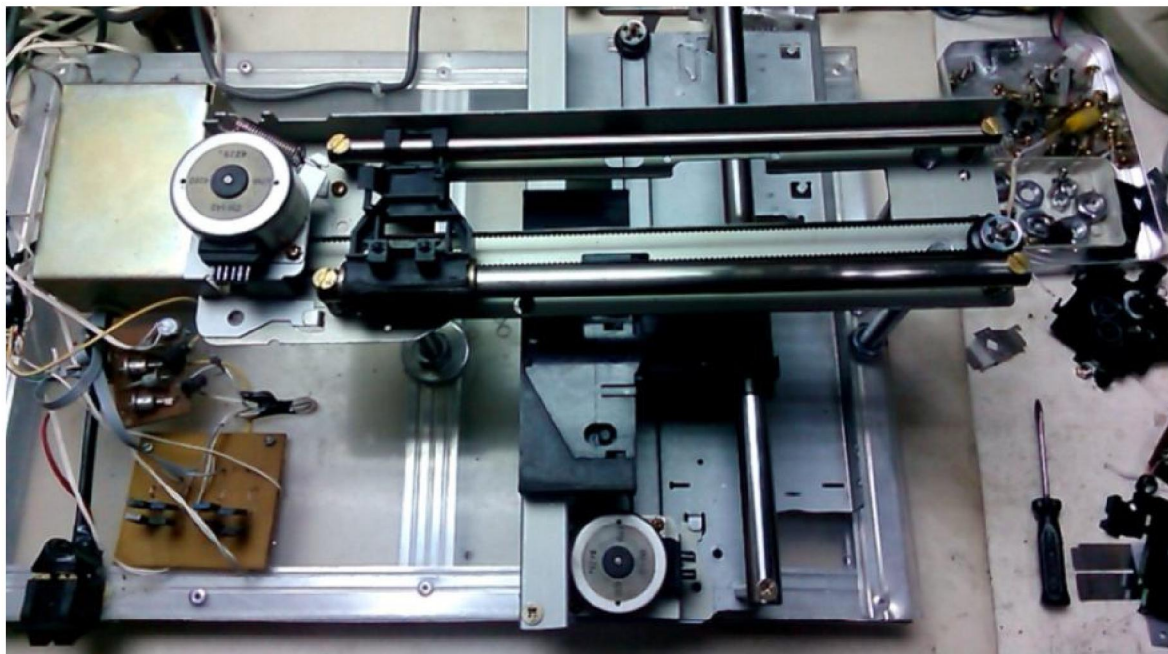


Рис. 6. Вид нижней части макета 3D-принтера

Пределы хода печатающей головки в разработанной нами устройстве по осям: X – 200 мм, Y – 160 мм, Z – 30 мм. По крайней мере для учебных целей этого достаточно.

Некоторые вопросы использования разработки 3D-принтера в интересах учебного процесса. Для разработки конструкции 3D-принтера (включая и его механическую часть) могут быть использованы различные системы САПР, что важно с позиций обеспечения учебного процесса студентов инженерно-технических специальностей вузов. Принципиальные электрические схемы блока контроллеров ШД могут быть реализованы с использованием проводного монтажа или печатных плат. В последнем случае для оптимизации размещения проводников на таких платах могут быть применены специальные программы (Deer Trace, Altium Designer и пр.). Их освоение может быть важной самостоятельной целью организации учебного процесса по инженерно-техническим специальностям.

Созданный авторами прототип (макет) 3D-принтера действует, а его себестоимость (даже с учетом трудозатрат авторов разработки) оказалось намного ниже, чем цены предлагаемых на рынке 3D-принтеров с аналогичными пределами хода печатающей головки.

Таким образом, разработка 3D-принтера может быть использована (помимо научно-исследовательских целей) и как пример «сквозного» проекта, в рамках которого студенты вузов смогут овладеть компетенциями из различных областей знаний. При этом приобретение таких компетенций хорошо ориентировано на конечный результат – создание действующего прототипа, на котором могут быть изготовлены прототипы отдельных небольших деталей оборудования. Отметим, что возможность быстрого получения результата в «вещественной форме» может быть важным с позиций мотивации работы студентов.

Описанный в статье проект может успешно выполняться группами студентов. При этом командная работа может быть организована с распределением между ними ролей [3] в отношении функциональных направлений проектирования (реализации) проекта.

Вариативность выполнения разработки может обеспечиваться за счет различий в выборе (разработке) программных средств управления, механических деталей, элементов РЭА. При наличии нескольких «команд разработчиков» между ними может быть организовано соревнование - в отношении скорости и качества конструкторской проработки и практической реализации устройств. В связи с этим отметим, что «сборка и наладка устройства» могут быть важной задачей, направленной на приобретение студентами навыков «работы руками».

Выводы. 1. Разработана математическая модель ШД как объекта управления. 2. Обоснованы алгоритмы управления ШД в прототипе 3D-принтера. 3. Описана конкретная техническая реализация синтезированных алгоритмов управления ШД на примере прототипа 3D-принтера. 4. Показано, что разработка прототипа 3D-принтера может быть использована как комплексный проект в учебном процессе технического вуза – в т.ч. для обучения студентам навыкам командной работы, сборки и наладки устройства.

Список литературы

1. Батырканов Ж. И. Синтез законов управления для осуществления движения объекта по предписанной программе / Ж. И. Батырканов, К. К. Кадыркулова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 1 (29). – С. 143–155.
2. Большаков В. Основы 3D-моделирования / В. Большаков, А. Бочков и другие. – Санкт-Петербург, 2012. – 304 с.
3. Брумштейн Ю. М. Анализ направлений использования информационных технологий для поддержки выполнения студентами групповых заданий / Ю. М. Брумштейн, В. Ю. Солопов, И. А. Дюдиков // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. – 2012. – № 4. – С. 85–95.
4. Карпенко Б. К. Шаговые электродвигатели / Б. К. Карпенко, В. И. Ларченко, Ю. А. Прокофьев – Киев : «Техніка», 1972. – 216 с.
5. Лейбов А. М. Применение технологий 3D-прототипирования в образовательном процессе / А. М. Лейбов, Р. В. Каменев, О. М. Осокина // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 93.
6. Скородумов С. В. Разработка опытной технологии лазерной стереолитографии : технический отчет / С. В. Скородумов, В. В. Кулагин, Е. Б. Дудин и другие. – Москва : Научно-исследовательский институт технологии автомобильной промышленности, 1995. – 68 с.
7. Толга А. В. Развитие информационных технологий. Трехмерная печать объектов / А. В. Толга, А. Д. Воронина // Перспективы развития науки и образования : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. – Тамбов, 2014. – С. 150–151.
8. Aaron Council 3D Printing: Rise of the Third Industrial Revolution / Aaron Council, Michael Petch. – 2014. – 116 p.
9. Canessa E. Low-cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development / E. Canessa, C. Fonda, M. Zennaro. – ICTP – The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013. – 119 p.
10. Jacobs P. F. Rapid Prototyping and Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography / P. F. Jacobs. – Society of Manufacturing Engineers, 1992. – 434 p.

References

1. Batyrkanov Zh. I., Kadyrkulova K. K. Sintez zakonov upravleniya dlya osushchestvleniya dvizheniya obekta po predpisannoy programme [Synthesis of management laws for implementation of the object movement by the ordered program]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2015, no. 1 (29), pp. 143–155.
2. Bolshakov V., Bochkov A., et al. *Osnovy 3D-modelirovaniya* [Bases of 3D-modelling], Saint Petersburg, 2012. 304 p.
3. Brumshteyn Yu. M., Solopov V. Yu., Dyudikov I. A. Analiz napravleniy ispolzovaniya informatsionnykh tekhnologiy dlya podderzhki vypolneniya studentami gruppovykh zadaniy [The analysis of the directions of information technologies usage for support of group tasks performance by students]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2012, no. 4, pp. 85–95.
4. Karpenko B. K., Larchenko V. I., Prokofev Yu. A. *Shagovye elektrodvigateli* [Stepping electric motors], Kiev, «Tekhnika» Publ., 1972. 216 p.
5. Leybov A. M., Kamenev R. V., Osokina O. M. Primenenie tekhnologiy 3D-prototipirovaniya v obrazovatelnom protsesse [Application of the 3D-prototypings technologies in educational process]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2014, no. 5, pp. 93.
6. Skorodumov S. V., Kulagin V. V., Dudin Ye. B., et al. *Razrabotka opytной tekhnologii lazernoy stereolitografii* [Development of skilled technology of laser stereolithograph], Moscow, Research Institute of the Automotive Industry Technology Publ. House, 1995. 68 p.
7. Tolga A. V., Voronina A. D. Razvitie informatsionnykh tekhnologiy. Trekhmernaya pechat obekтов [Development of information technologies. Three-dimensional print of objects]. *Perspektivy razvitiya nauki i obrazovaniya : sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects of Development of Science and Education. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference], Tambov, 2014, pp. 150–151.
8. Aaron Council, Michael Petch. *3D Printing: Rise of the Third Industrial Revolution*, 2014. 116 p.
9. Canessa E., Fonda C., Zennaro M. *Low-cost 3D Printing for Science, Education and Sustainable Development*, ICTP – The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics Publ. House, 2013. 119 p.
10. Jacobs P. F. *Rapid Prototyping and Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*, Society of Manufacturing Engineers Publ. House, 1992. 434 p.