КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. АРАБАЕВА

КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. РАЗЗАКОВА

Диссертационный Совет Д.05.18.584

На правах рукописи
УДК: 681.5.013: 625.031 (043.3)

КАДЫРКУЛОВА КЫЯЛ КУДАЙБЕРДИЕВНА

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ОБЪЕКТА

Специальность 05.13.06 – “Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами”

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Бишкек 2019

Работа выполнена в Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова

Научный руководитель: **Батырканов Ж.И.,** доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Автоматическое управление» КГТУ им. И. Раззакова

Официальные оппоненты: **Айтчанов Б.Х.,** доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные науки» Казахско-турецкого университета им. Сулеймана Демиреля

Жолдошов Т.М., к.т.н., доцент кафедры информатики Ошского государственного университета

Ведущая организация: Кыргызский национальный аграрный университет им. К.И. Скрябина, 720005, г. Бишкек, ул. Медерова 68

Защита состоится 28 июня 2019 года в 16.00 часов на заседании Диссертационного совета Д.05.18.584 Кыргызском государственном университете им. И. Арабаева, по адресу: 720026, г. Бишкек, ул. Раззакова 51, корпус №2, конференц зал, веб-сайт: www.arabaev.kg.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках КГУ им. И. Арабаева и КГТУ им. И. Раззакова по адресу: 720026, г. Бишкек, ул. И. Раззакова 51 и 720044, г. Бишкек, пр. Айтматова 66

Автореферат разослан “28” мая 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент Н.А. Исраилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы. На сегодняшний день во многих областях автоматизации технологических процессов ставится задача управления различными механизмами по заданным предписанным программам движения.

Это, в первую очередь, касается управления робототехническим устройствам, когда рабочие органы (рука, захватывающие устройства) промышленных манипуляторов должны отрабатывать заданные предписанные траектории движения.

Во-вторых, это касается управления 3D-принтером, когда печатающие органы 3D-принтера должны осуществлять движение по заданным предписанным траекториям.

В условиях рыночной экономики осуществляется быстрый переход от выпуска одной номенклатуры изделий к другой, при этом осуществляется мелкосерийное и даже единичное производство. Такие технологии организации производства появились благодаря применению робототехнических комплексов и использования, в последнее время, 3D-технологий. Такие технологии организации производства очень полезны для экономики Кыргызстана.

На сегодняшний день отсутствуют универсальные и в то же время эффективные методы синтеза законов управления по осуществлению движения управляемых объектов по произвольно заданным предписанным траекториям. К настоящему времени более или менее решены задачи осуществления предписанных движений, когда рассматривается линейный объект управления и когда предписанная траектория движения задаётся (описывается) в аналитической форме.

В большинстве случаев на практике, как в случаях построения систем управления с промышленными роботами, так и в случаях применения 3D-принтеров предписанную траекторию движения описать аналитически очень сложно.

Это связано с тем, что форму изготавливаемых деталей в 3D-технологиях в подавляющем большинстве случаев аналитически описать невозможно. В робототехнике, когда применяются роботы последних поколений (контурно - адаптивные, интеллектуальные), описать аналитически траекторию движения руки манипулятора, также очень трудно.

Поэтому, стоит очень актуальная как в практическом, так и в теоретическом аспекте разработка новых эффективных методов синтеза

законов управления по осуществлению движений объектов по заранее заданной предписанной траектории движения.

В связи с вышесказанным в данном диссертационном исследовании разрабатывается новый подход к синтезу законов управления по осуществлению движений объектов по заданным предписанным траекториям движения.

Связь темы диссертации с научными программами и научно-исследовательскими работами.

Работа выполнена в Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова в рамках госбюджетных НИР Университета и научных грантов МО и Н КР в 2011-2017 гг.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является разработка нового подхода синтеза управления, осуществляющего движение объекта по предписанной траектории, на основе применения концепции обратных задач динамики.

Задачи исследований:

- анализ современного состояния проблемы управления траекторным движением объекта;
- разработка метода синтеза управления траекторным движением, в случае, когда предписанная траектория задаётся в аналитической форме;
- разработка метода синтеза управления траекторным движением, в случае, когда предписанная траектория задаётся в табличной форме;
- разработка математических моделей приводов для промышленных манипуляторов и 3D-принтеров.

Новизной научных результатов является:

- расширение и усовершенствование ранее известных методик синтеза управления траекторным движением, в случае когда предписанная траектория задаётся аналитически;
- впервые совместно, с научным руководителем Ж.И. Батыркановым, предложена новая методика синтеза управления, когда предписанная траектория движения задаётся в табличной форме;
- получена новая математическая модель шагового привода 3D-принтера.

Практическая значимость полученных научных результатов заключается в следующем:

- разработанные методики синтеза законов управления обеспечивающих движение объекта по заданной траектории в достаточной степени формализованы и позволяют эффективно, конструктивно определять искомые законы управления;

- разработанные методики синтеза позволяют проводить процедуру синтеза по таблично заданным предписанным траекториям движения, когда предписанную траекторию невозможно описать аналитически;
- разработанные методики синтеза очень успешно работают, в случаях, когда использование известных методик синтеза затруднительно: это в первую очередь касается задач синтеза законов управления для приводов промышленных роботов и 3D-принтеров. В связи с тем, что практическое применение 3D-принтеров, только начинается, разработанные методики синтеза практически очень значимы.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- подход к синтезу законов управления, обеспечивающих движение объекта по предписанной траектории движения;
- подход к синтезу управления в случае задания предписанной траектории движения в табличной форме;
- разработанная математическая модель шагового привода 3D-принтера, как объекта управления в задачах осуществления траекторного движения;
- программное и техническое обеспечение системы управления экспериментальным 3D-принтером.

Личный вклад соискателя.

Все научно-технические результаты работы получены диссертантом под руководством научного руководителя.

В опубликованных работах, в соавторстве с научным руководителем, постановка задач и общий подход исследований принадлежит научному руководителю, конкретная процедура синтеза и моделирования принадлежит диссертанту.

Апробация результатов диссертации.

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных симпозиумах, республиканских, межвузовских конференциях:

- научно-технической конференции КСТУ, 2014 г.;
- международной научно-технической конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Молодёжь в инновационных исследованиях», Бишкек 2016 г.;
- международной телеконференции, 2018 г. (МГУ им. Н.П. Огарева, МЭИ и КГТУ им. И. Раззакова).
- в ежегодных научно-технических конференциях молодых учёных аспирантов и студентов КГТУ им. И. Раззакова, 2007-2017гг.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 24х работах.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, приложения, и списка литературы. Объем диссертации составляет 175 страниц машинописного текста, включая 37 рисунков и 4 таблицы, список литературы, содержащий 115 наименований печатных изданий и 15 наименований электронных источников информации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведён анализ существующих подходов и методов синтеза законов управления по осуществлению траекторного движения объекта.

Отмечаются достоинства и недостатки, области целесообразного применения рассматриваемых методов.

В этой главе, проведён критически анализ работ известных учёных: Е.А. Барбашина, Н.П. Еругина, А.С. Галиулина, В.Д. Фурасова, Л.М. Бойчука, С.В. Емельянова, П.Д. Крутько, А.П. Крищенко, И.В. Мирошника, А.Н. Шалаева. Кроме анализа работ вышеназванных учёных проведён анализ работ известных - учёных Кыргызстана и Казакстана: Ж.Ш. Шаршеналиева, В.П. Живоглядова, Т.Т. Оморова, У.Н. Бримкулова, Ж.И. Батырканова, Р.О. Оморова, Е.Л. Миркина, М.Ф. Баймухамедова, Б.Х. Айтчанова, Д.Ж. Сыздыкова, М.А. Бейсенби и других.

Произведённый анализ современного состояния проблемы синтеза законов управления, по осуществлению движения объекта по заданной предписанной траектории позволяет сделать следующее выводы:

- решение проблемы синтеза на данное время до конца не решены, это связано с трудностями при рассмотрении нелинейных и многомерных систем;
- процедуры синтеза на основе применения концепции обратных задач динамики позволяют задавать желаемые процессы, движения в прямом неформальном виде;
- рассмотренные немногочисленные методы синтеза основанные на концепциях обратных задач динамики, в основном, ограничены классом одномерных систем;
- в подавляющем большинстве случаев существующие методы синтеза работают только в случаях, когда предписанные траектории движения задаются в аналитической форме.

• к сегодняшнему дню во многих прикладных задач, таких, как управление рабочими органами промышленных манипуляторов, рабочими органами 3D-принтеров, управление движением крылатых ракет и в других ставятся задачи осуществления движения по заданным предписанным траекториям.

В силу вышеперечисленных проблем синтеза, а также вследствие расширения использования промышленных роботов и 3D-принтеров для различных сфер практики, постановка задачи конструктивных методов синтеза законов управления по осуществлению движения по заданной предписанной траектории движения с позиции обратных задач динамики является **актуальной**, как в теоретическом, так и практических аспектах.

В-второй главе описываются подходы синтеза управлений траекторным движением объекта в случаях: когда предписанная траектория движения описывается в аналитической форме; когда предписанная траектория задаётся в табличной форме. Описывается также, подход адаптивного управления в случае параметрических возмущений.

Рассматривается объект описываемый математической моделью в классе

$$\dot{x} = F(x) + G(x)u, \tag{1}$$

где $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^T$ – *вектор состояния,*

$u = (u_1, u_2, \ldots, u_m)^T$ – *вектор управления.*

$F(x)$ – в общем случае нелинейная вектор функция;

$G(x)$ – матрица элементы которой, нелинейные функции от “ x ”

Предписанная траектория движения задаётся в виде системы аналитических выражений

$$\Psi_r(x,t) = 0, \quad r = \overline{I,s} \tag{2}$$

Введя понятие ошибки выполнения заданной предписанной траектории

$$\delta_r = \Psi_r(x,t) \neq 0, \;\; r = \overline{I,s} \;. \tag{3}$$

Назначая, далее, требуемый закон отработки ошибки выполнения программы движения в виде

$$\frac{d\delta_r}{dt} = R_r(\delta, x, t), \;\; R_r(0, x, t) = 0, \;\; r = \overline{I,s}, \quad \delta_r = \Psi_r(x,t) \neq 0, \tag{4}$$

получаем соответствующие алгебраические соотношения из которых определяются искомые законы управления. Выбор произвольной функций R_r осуществляется из требуемой динамики отработки ошибки и условий физической реализуемости.

В зависимости от линейной зависимости или линейной независимости векторов $G^T \frac{\partial \Psi_r}{\partial x}$, $r = \overline{I,s}$, процедура синтеза будет осуществляться

разными путями. В том случае, когда векторы $G^T \frac{\partial \Psi_r}{\partial x},\ r = \overline{I,s}$ представляют собой линейно независимую систему, процедура синтеза осуществляется на основе

$$\left(G^T(x)\frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, U\right) = R_r(\Psi, x, t) - \left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial x},\ F(x)\right) - \frac{\partial \Psi_r}{\partial t},\ r = \overline{I,s} \qquad (5)$$

которая определяется из (4).

Отсюда, в соответствии с результатами, которые приведены в приложении 2, вектор управления определяется как

$$U = \sum_{i=1}^{s} C_i G^T(x)\frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, \qquad (6)$$

где коэффициенты C_i , $r = \overline{I,s}$ определяется из следующей системы:

$$\sum_{j=1}^{s} C_j\left(G^T(x)\frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, G^T(x)\frac{\partial \Psi_j}{\partial x}\right) = R_i - \left(\frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, F(x)\right) - \frac{\partial \Psi_i}{\partial t}, i = \overline{I,s} \qquad (7)$$

В том случае, когда система векторов $G^T(x)\frac{\partial \Psi_r}{\partial x},\ r = \overline{I,s}$ не является линейно независимой, процедура синтеза осуществляется с использованием следующей системы:

$$\left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, GU\right) = R_r - \left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, F(x)\right) - \frac{\partial \Psi_r}{\partial t},\ r = \overline{I,s} \qquad (8)$$

Из этой системы, в соответствии с приложением 2, первоначально определяется

$$G(x)U = \sum_{i=1}^{s} C_i \frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, \qquad (9)$$

где коэффициенты C_i определяются из системы

$$\sum_{j=1}^{s} C_j\left(\frac{\partial \Psi_l}{\partial x}, \frac{\partial \Psi_j}{\partial x}\right) = R_i - \left(\frac{\partial \Psi_i}{\partial x}, F(x)\right) - \frac{\partial \Psi_i}{\partial t}, i = \overline{I,s} \qquad (10)$$

Далее искомый вектор управления определяется из (9). Здесь искомый вектор управления для требуемой предписанной траектории существует только в том случае, когда выполняется условие

$$rank\left(G(x) \vdots \sum_{i=1}^{s} C_i \frac{\partial \Psi_i}{\partial x}\right) = rank\ G(x) \qquad (11)$$

Если данное условие не выполняется, то это говорит о невозможности осуществления движения управляемой системы по заданной (предписанной) траектории.

В частном случае, когда $F(x) = Ax,\ G(x) = B$ имеем линейный объект вида

$$\dot{x} = Ax + Bu, \qquad (12)$$

где A, B $-$ числовые матрицы коэффициентов

Подход к синтезу законов управления в случаях задания предписанной траектории движения в табличной форме.

В этом подходе предписанную траекторию движения отображают в виде таблицы из контрольных точек через которую проходит система в соответствующие дискретные моменты времени.

Пусть объект описывается системой

$$\dot{x} = f(x, u, t) \tag{13}$$

требуется синтезировать закон управления по осуществлению движения управляемой системы по предписанной траектории, заданной в табличной форме.

Таблица 1. - Предписанная траектория движения, заданная в табличной форме

t_k	t_0	t_1	t_2	t_3	…
x_1	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	…
x_2	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	…
…	…	…	…	…	…
x_n	x_{n0}	x_{n1}	x_{n2}	x_{n2}	…

Для удобства принимается $t_k = k$, $k = 0,1,2,...,$ то есть вводится абстрактные дискретные моменты времени.

Математическая модель объекта записывается в дискретной форме

$$\frac{x(k+1) - x(k)}{t_{k+1} - t_k} = f(x(k), u(k), k),$$

или

$$\frac{x(k+1) - x(k)}{\Delta} = f(x(k), u(k), k), \tag{14}$$

$$x(k+1) = x(k) + f(x(k), u(k), k)\Delta, \tag{15}$$

где $x(k)$ - текущее состояние, $x(k+1)$ - состояние на следующем шаге. Это выражение связывает текущее состояние $x(k)$, текущее управление $u(k)$ и состояние $x(k+1)$ в следующий момент времени.

Из выражения (14) можно определить $u(k)$:

$$u(k) = U(x(k), x(k+1), k, \Delta);$$

Однако такой способ не гарантирует устойчивого осуществления движения по требуемым предписанным дискретным точкам движения.

Поэтому, искомое управление будем находить путем минимизации квадрата невязки между требуемыми и текущими дискретными значениями состояния управляемого объекта.

Таким образом управление будем искать в виде:

$$\left\| x_{табл}(k+1) - x_{текущ}(k+1) \right\|^2 \Rightarrow \min_{u(k)} \tag{16}$$

где $x_{табл}(k+1)$ – табличное значение, $x_{текущ}(k+1)$ – текущее значение.

Распишем выражение (14) подробно

$$(x_{табл}(k+1) - x_{текущ}(k+1), x_{табл}(k+1) - x_{текущ}(k+1)) =$$
$$(x_{табл}(k+1) - x(k) - f(x(k), u(k), k)\Delta, x_{табл}(k+1) - x(k) - f(x(k), u(k), k)\Delta \Rightarrow \min_{u(k)}$$

Затем взяв частную производную по *u(k)* от этого выражения, найдём необходимое управление

$$\frac{\partial(,)}{\partial u(k)} = 0 \Rightarrow u(k) = ?$$

Распишем эту процедуру для линейного объекта

$$x(k+1) = x(k) + Ax(k)\Delta + Bu(k)\Delta;$$

или

$$x(k+1) = (A\Delta + E)x(k) + Bu(k)\Delta; \tag{17}$$

Подставив конкретные выражения, возьмём скалярные произведения, и получим общее выражение:

$$x_{табл}(k+1) = (A\Delta + E)x(k) + B\Delta u(k), x_{табл}(k+1) = (A\Delta + E)x(k) + B\Delta u(k)) = x^T{}_{табл}(k+1) =$$
$$x^T(k)(A^T\Delta + E) - u^T(k)B^T\Delta, x_{табл}(k+1) - (A\Delta + E)x(k) + B\Delta u(k) =$$
$$(x^T{}_{табл}(k+1)(x_{табл}(k+1) - (x^T{}_{табл}(k+1)(A\Delta + E)x(k) - (x^T{}_{табл}(k+1)B\Delta u(k) -$$
$$x^T(k)(A^T\Delta + E)(x^T{}_{табл}(k+1) + (x^T(k)(A^T\Delta + E)(A\Delta + E(x(k) +$$
$$x^T(k)(A^T\Delta + E)B\Delta u(k) - u^T(k)B^T\Delta x_{табл}(k+1) + u^T(k)B^T\Delta(A\Delta + E)x(k) + u^T(k)B^T\Delta B\Delta u(k)$$

Возьмём частную производную по $u(k)$

$$-B^T\Delta x_{табл}(k+1) + B^T(A\Delta + E)\Delta x(k) - B^T\Delta x_{табл}(k+1) +$$
$$B^T(A\Delta + E)\Delta x(k) + B^T B\Delta^2 u(k) + B^T B\Delta^2 u(k) = 0$$

Отсюда, закон управления управление определяется в виде

$$u(k) = -\frac{1}{2\Delta^2}(B^T B)^{-1}[2B^T\Delta x_{табл}(k+1) - 2B^T(A\Delta + E)\Delta x(k)] =$$
$$-\frac{1}{\Delta^2}(B^T B)^{-1}[-B^T\Delta x_{табл}(k+1) - B^T(A\Delta + E)\Delta x(k)] = \tag{18}$$
$$\frac{1}{\Delta^2}(B^T B)^{-1}[B^T\Delta x_{табл}(k+1) - B^T(A\Delta + E)\Delta x(k)]$$

Адаптивное управление траекторным движением

Рассмотрим подход к синтезу адаптивного закона управления траекторным движением в случае параметрических возмущений в объекте.

Объект описывается системой

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Delta Ax, \tag{19}$$

где A, B – числовые детерминированные матрицы; $\Delta A -$ матрица параметрических возмущений

Матрица неизвестных параметров объекта удовлетворяет так называемому условию квазистационарности, при котором предполагается, что параметры объекта изменяются намного медленнее, чем переменные состояния. В соответствии с этим, принимается

$$\frac{d(\Delta \mathrm{A})}{dt} \approx 0 \tag{20}$$

Предписанная программа движения задаётся в виде уравнений

$$\Psi_\eta(x,t) = 0, \quad r = I, s \quad s \leq n. \tag{21}$$

Предполагается при этом, что ранг матрицы $\frac{\partial \Psi}{\partial x}$ равен “**s**”.

Задачу синтеза адаптивного закона управления программным движением сформулируем следующим образом. Требуется синтезировать адаптивный закон управления в классе

$$\begin{cases} \mathrm{U} = U_{\text{пр}}(x,t) - C \cdot x, \\ \dot{C} = \Psi(x,c,t). \end{cases} \tag{22}$$

где C – матрица настраиваемых параметров регулятора, при котором движение системы (19) осуществляется по предписанной программе (21).

Для решения поставленной задачи вводится понятие ошибки выполнения предписанной программы движения

$$\begin{cases} \delta_r = \Psi_r(x,t) \neq 0, \\ \delta_r \to 0, \quad r = \overline{I,s} \end{cases}. \tag{23}$$

Далее используется метод функций Ляпунова в следующем аспекте.

Функция Ляпунова формируется в виде

$$V(\delta,\gamma) = \sum_{r=1}^{s} \delta_r^2 + \sum_{i=1}^{n} (\gamma_i, \gamma_i), \tag{24}$$

где $\gamma_i = (\Delta A - BC)_i - i$-ая строка матрицы $(\Delta A - BC\ )$

Для отыскания искомого закона сперва, вычисляем полную производную функции Ляпунова на движениях системы, затем приравняем его к произвольной знакоопределенной функции относительно переменных $\delta_1, \dots, \delta_n$.

Рассмотрим эту схему построения искомого закона управления. Вычисляем полную производную функции Ляпунова на движениях системы. Имеем

$$\dot{V} = \sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, Ax + Bu_{\text{пр}}\right) + \sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, (\Delta A + \text{BC})\text{x}\right) +$$

$$+ \sum_{r=1}^{n} 2(\gamma_i \cdot \dot{\gamma}_i) + \sum_{r=1}^{n} \frac{\partial \Psi_r^2}{\partial t} \qquad (25)$$

$$\sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial \text{x}}, (\Delta A - \text{BC})x\right) = \sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \sum_{r=1}^{n} \frac{\partial \Psi_r}{\partial x}(\gamma_i, x) \qquad (26)$$

Производя преобразования получим

$$\dot{V} = \sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, Ax + Bu_{\text{пр}}\right) +$$

$$+ \sum_{r=1}^{n} \left[2(\gamma_i \cdot \dot{\gamma}_i) + \sum_{r=1}^{n} \Psi \frac{\partial \Psi_r}{\partial \text{x}_1} \text{x}\right] + \sum_{r=1}^{n} \frac{\partial(\Psi_r^2)}{\partial t} \qquad (27)$$

Потребуем выполнения условия

$$\dot{V} = a(x) \cdot R(\delta_1 \dots, \delta_n, x) \qquad (28)$$

где a(x) – знакоотрицательная функция выбираемая из условия физической реализуемости синтезируемого закона управления;

$R(\delta_1, \dots, \delta_n, x)$ – произвольная положительно определённая по переменным $\delta_1, \dots, \delta_n$ функция.

Если закон управления определить из системы (27), (28), то очевидно, что согласно известным теоремам В.В. Румянцева, цель управления (20) будет достигнута. Таким образом, из систем (27), (28) определяем, во-первых, закон настройки параметров регулятора в виде

$$\dot{\gamma}_{1=-} \sum_{r=1}^{n} \Psi_r \frac{\partial \Psi_r}{\partial \text{x}_1} x^T, \qquad (29)$$

и во-вторых, определяем программную часть закона управления. Для определения последнего имеем

$$\sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, Ax + Bu_{\text{пр}}\right) + \sum_{r=1}^{n} \frac{\partial(\Psi_r^2)}{\partial t} = a(x) \cdot R(\delta_1 \dots, \delta_n, x) \qquad (30)$$

где $\delta_1 = \Psi_r(x, t \neq 0)$.

Запишем последнее выражение в следующем равносильном виде:

$$\sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \left(\frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, Bu_{\text{пр}}\right) = a(x \cdot R(.,.,.) - \sum_{r=1}^{n} \frac{\partial(\Psi_r^2)}{\partial t} - \left(\sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, Ax\right) \qquad (31)$$

из уравнения (31) окончательно имеем

$$U_{\text{пр}} = \left[a(x) \cdot R(.,.,.) - \sum_{r=1}^{n} \frac{\partial(\Psi_r^2)}{\partial t} - \left(\sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, Ax\right)\right] \cdot$$

$$\cdot \left(B^T \sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \frac{\partial \Psi_r}{\partial x}, B^T \sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \frac{\partial \Psi_r}{\partial x},\right)^{-1} \cdot B^T \sum_{r=1}^{n} 2\Psi_r \frac{\partial \Psi_r}{\partial x} \qquad (32)$$

С учётом обозначений для γ_i и условий квазистационарности алгоритм настройки (29) окончательно запишется в виде

$$(B\dot{C})_i = \sum_{r=1}^{n} \varphi_r \frac{\delta \psi_r}{\delta X_1} x^T, \; i = 1, n \qquad (33)$$

где через $(B\dot{C})_i$, обозначается i-я строка матрицы BC.

В третьей главе рассматривается применение разработанных подходов синтеза к некоторым задачам из практики. Во-первых, рассматривается задача синтеза управления для шаговых приводов 3х-звенного манипулятора. Рассматривается 3х-звенный манипулятор каждое кинематическое звено которого приводится в движение своим шаговым приводом. Предписанная траектория движения рабочего органа манипулятора (захватного устройства) в пространстве задаётся в табличной форме. На основе разработанной во второй главе диссертации, теории синтеза и разработанной математической модели шагового привода, как объекта управления применительно к табличной форме задания предписанной траектории движения захватного устройства определены искомые законы управления для каждого привода.

Проведённое компьютерное моделирование синтезированной системы управления подтвердило, что движение рабочего органа манипулятора происходит согласно табличным данным.

В третьей главе, также решается задача построения системы управления прототипом 3D-принтера. Рассматривается 3D-принтер работающий по FDM технологии то есть, по технологии изготовления детали путём послойного наплавления материалов.

Цифровой образ изготавливаемой детали представляется в табличной форме. Табличная форма изготавливаемой (печатаемой) детали отражает пространственные координаты контрольных точек в изготавливаемой детали через которые, проходит головка экструдера 3D-принтера в заданные дискретные моменты времени.

По требуемой пространственной модели изготавливаемой детали (Рис. 1.) строится таблица для предписанной траектории движения рабочего органа 3D- принтера (табл. 2.).

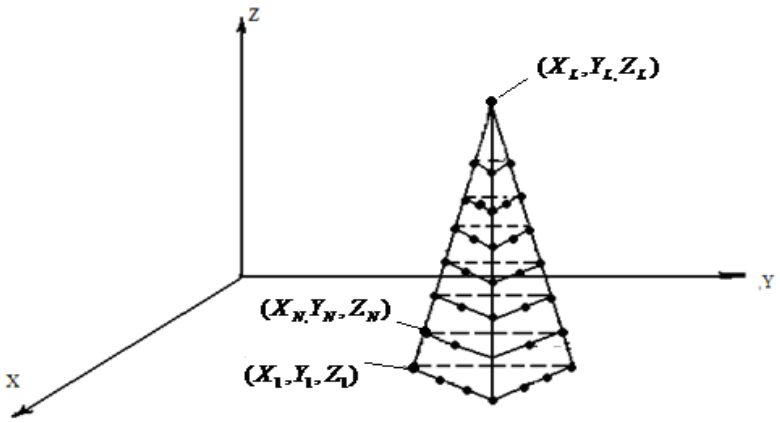

Рис.1. Пространственная модель детали с нанесёнными на неё контрольными точками.

Таблица 2. - Предписанные координаты контрольных точках траектории

t_s	t_1	t_2	$\cdots$	t_k	t_{k+1}	$\cdots$	t_L	t_{L+1}
x_s	x_1	x_2	$\cdots$	x_k	x_{k+1}	$\cdots$	x_L	x_{L+1}
y_s	y_1	y_2	$\cdots$	y_k	y_{k+1}	$\cdots$	y_L	y_{L+1}
z_s	z_1	z_2	$\cdots$	z_k	z_{k+1}	$\cdots$	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 3D - принтером. Далее движение выполняется по 3-ему слою и.т.д. В конце работы осуществляется переход к конечному положению (X_L, Y_L, Z_L).

Для табличного представления траектории движения рабочего органа 3D-принтера (головка экструдера), разработана математическая модель шагового привода, как объекта управления в виде

$$\begin{cases} X_{k+1} = \mathrm{X}_k + n_{kx} \cdot l_{шx} \\ \mathrm{Y}_{k+1} = \mathrm{Y}_k + n_{ky} \cdot l_{шy} \\ Z_{k+1} = Z_k + n_{kz} \cdot l_{шz} \end{cases} \tag{34}$$

где $\mathrm{X}_k, \mathrm{Y}_k, \mathrm{Z}_k$ - текущие координаты рабочих органов принтера по осям $\mathrm{X}, \mathrm{Y}, \mathrm{Z}$ в κ - ый момент времени; $\mathrm{X}_{k+1}, \mathrm{Y}_{k+1}, \mathrm{Z}_{k+1}$ – координаты рабочих органов по осям $\mathrm{X}, \mathrm{Y}, \mathrm{Z}$ в $(k+1)$ момент времени; n_{kx}, n_{ky}, n_{kz} - количества импульсов поданных на шаговых двигателях (ШД) приводов по осям $\mathrm{X}, \mathrm{Y}, \mathrm{Z}$ за указанный промежуток времени; $l_{шx}, l_{шy}, l_{шz}$ – величины линейных шагов рабочего органа по осям $\mathrm{X}, \mathrm{Y}, \mathrm{Z}$ от действия одиночных импульсов на соответствующие ШД. Где параметры $l_{шx}, l_{шy}, l_{шz}$ – определяются конструктивными данными шаговых двигателей и посаженных на вал шаговых двигателей передаточных механизмов.

Из предписанной таблицы движения табл. 2. и системы (34) определяют искомые количества импульсов подаваемых на обмотки шаговых двигателей на отрезке времени $[t_k,\ t_{k+1}]$ в виде

$$\begin{cases} n_{kx} = \frac{X_{k+1}-X_k}{L_{шx}}, \\ n_{ky} = \frac{Y_{k+1}-Y_k}{L_{шy}}, \\ n_{kz} = \frac{Z_{k+1}-Z_k}{L_{шz}}. \end{cases} \tag{35}$$

Для технической реализации синтезированных законов управления шаговыми приводами использованы ПЭВМ, микроконтроллер Arduino и соответствующие микросхемы.

Для апробации синтезированных законов управления шаговыми приводами был разработан и изготовлен экспериментальный 3D – принтер. Структурно - функциональная схема системы управления 3D – принтера с использованием Arduino показано на рис. 2. внешний вид макета представлен на рис. 3. Результаты натурных испытаний разработанного прототипа 3D – принтера показали, что действительно рабочий орган 3D – принтера осуществляет движение согласно заданным табличным данным.

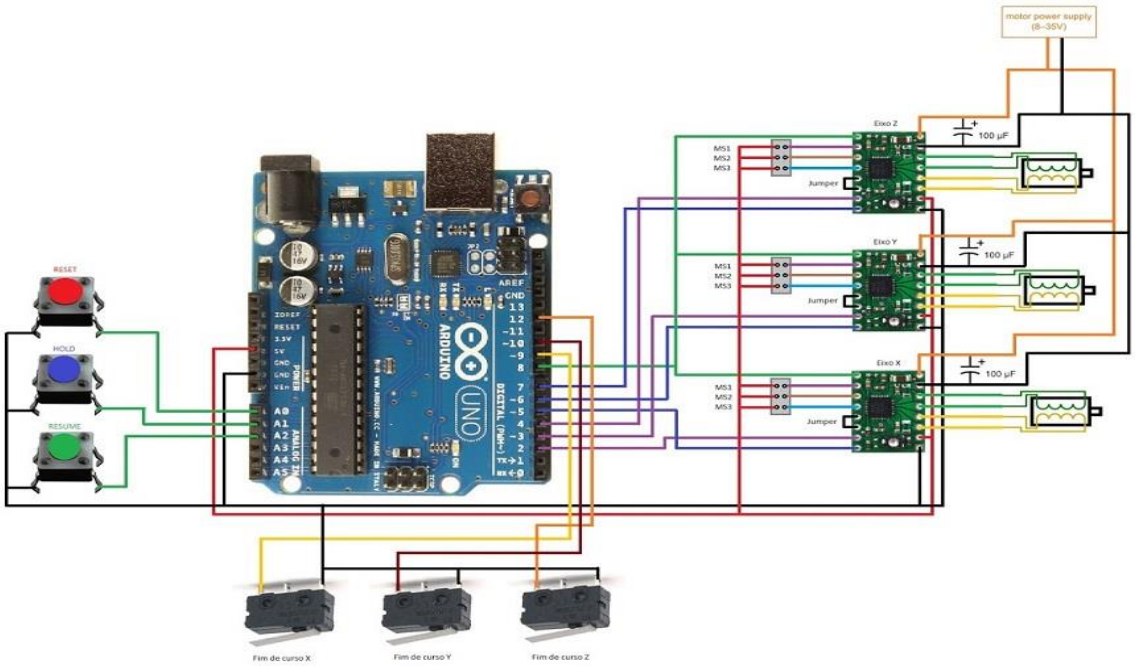

Рис.2. Функциональная схема системы управления 3D – принтера с использованием Arduino.

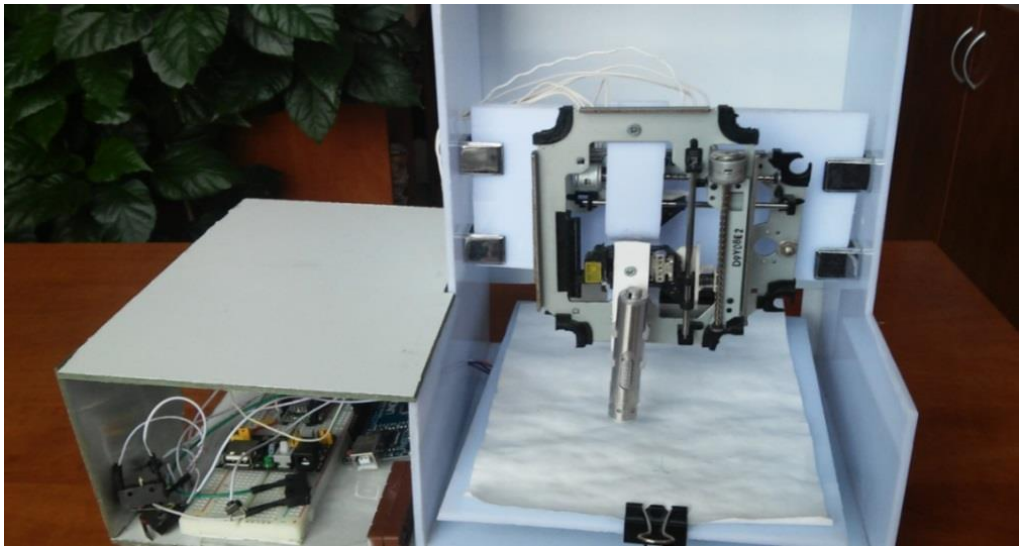

Рис.3. Внешний вид макета прототипа 3D-принтера

Выводы

В результате диссертационных исследований разработана теория и конструктивные процедуры синтеза управления по осуществлению движения объекта по предписанной траектории:

- разработан подход синтеза в случаях задания предписанной траектории движения в аналитической форме;
- разработан подход синтеза в случаях задания предписанной траектории движения в табличной форме;
- для линейного многомерного объекта, подверженного параметрическим возмущениям, разработан подход к синтезу адаптивного управления траекторным движением;
- для рассматриваемых классов управляемых объектов разработан критерий осуществимости траектории движения на языке ранга соответствующих матриц;
- разработаны математические модели шаговых двигателей, применяемых в 3D-принтерах, как объектов управления.

Разработанные теоретические положения апробированы на множестве модельных задач, а также при решении конкретных прикладных задач.

Результаты моделирования на ПЭВМ, а также натурные испытания разработанного прототипа 3D-принтера полностью подтверждают положения разработанной теории.

Разработанный подход к синтезу в случае задания предписанной траектории в табличной форме позволяет синтезировать законы управления приводами 3D-принтера для деталей любых форм, изготавливаемых на 3D-принтере.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. **Батырканов, Ж.И.** Задача управления по заданной программе [текст] / Ж.И. Батырканов, А.Д. Мадраимова, К.К. Кадыркулова // Известия КГТУ им. И. Раззакова, №11. – Бишкек, 2007. – С. 144 -147.

2. **Батырканов, Ж.И.** Синтез управления по таблично заданным программам [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова // Материалы 50-юбилейной научной конференции молодых учёных и студентов. «Новая генерация учёных - будущее Кыргызстана». КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2008. – С. 177-180.

3. **Батырканов, Ж.И.** Синтез управления по таблично заданным программам движения [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова // Материалы международной конференции. КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек, 2008. – С. 203-207.

4. **Батырканов, Ж.И.** Адаптивное управление траекторным движением [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова // Известия КГТУ им. И. Раззакова, №19. – Бишкек, 2009. – С. 130-132.

5. **Батырканов, Ж.И.** Траекторное управление объектом по таблично заданным программам [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова // Материалы международной конференции, посвященный 70-летию академика А. Жайнакова. Известия КГТУ им. И. Раззакова, № 24. – Бишкек, 2011. – С. 290-295.

6. **Кадыркулова, К.К.** Создание аппаратно-программных средств контроля и управления электромеханическими объектами [текст] / К.К. Кадыркулова // Известия КГТУ им. И. Раззакова, №27. Бишкек, 2012. – С. 121-123.

7. **Кадыркулова, К.К.** Адаптивное управление при таблично заданных предписанных траекториях движения [текст] / К.К. Кадыркулова // Известия КГТУ им. И. Раззакова, №29. – Бишкек, 2013. – С. 255-257.

8. **Батырканов, Ж.И.** Синтез законов управления по осуществлению движения управляемого объекта по предписанной программе [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова // Вестник науки КСТУ им. З. Алдамжар, №3 – Костанай, 2013. – С. 29-34.

9. **Кадыркулова, К.К.** Программное управление многомерных систем на основе решения обратных задач динамики [текст] / К.К. Кадыркулова // Известия КГТУ им. И. Раззакова, №30. – Бишкек, 2013. – С. 141-144.

10. **Батырканов, Ж.И.** Синтез законов управления по осуществлению движения управляемого объекта по предписанной программе [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова // Актуальные проблемы теории

управления, топологии и операторных уравнений (тезисы докладов). КРСУ им. Б. Ельцина. – Бишкек, 2013. – С. 40-41.

11. **Батырканов, Ж.И.** Стабилизатор угловой скорости [текст] / Ж.И. Батырканов, А.М. Мамышов, К.К. Кадыркулова // Известия КГТУ им. И. Раззакова, №31. – Бишкек, 2014. – С. 112-114.

12. **Батырканов, Ж.И.** Синтез законов управления по осуществлению движения по предписанной программе [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова // Вестник науки КСТУ им. З. Алдамжар, №3. – Костанай, 2014. – С. 40-47.

13. **Батырканов, Ж.И.** Синтез законов управления для осуществлению движения объекта по предписанной программе [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. Научно-технический журнал, №1 (29). – Астрахань, 2015. – С. 181 – 192.

14. **Кадыркулова, К.К.** Компьютерное управление прототипом 3D-принтера [текст] / К.К. Кадыркулова, В.З. Шакиров // Известия КГТУ им. И. Раззакова, № 35(2), – Бишкек, 2015. – С. 74-78.

15. **Батырканов, Ж.И.** Управление шаговым приводом 3D – принтера [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова, Ш.А. Белялов // Известия КГТУ им. И. Раззакова, №3(36). – Бишкек, 2015. – С. 35-42.

16. **Батырканов, Ж.И.** Управление шаговым приводом 3D – принтера: математическая модель и вопросы технической реализации [Электронный ресурс] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова, Ш.А. Белялов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. Научно-технический журнал, № 1 (33), – Астрахань, 2016. – С. 128-138.

17. **Кадыркулова, К.К.** Разработка системы управление движением робота по предписанной траектории [текст] / К.К. Кадыркулова, И.Э. Сокенов, В.А. Шинкарева // “Молодёжь – движущая сила науки”. КГТУ им. И. Раззакова. Часть I, – Бишкек, 2016. – С. 122-128.

18. **Батырканов, Ж.И.** Управление шаговым приводом 3d – принтера [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова // Вестник науки КСТУ им. З. Алдамжар, №3. – Костанай, 2016. – С. 9-19.

19. **Batyrkanov, Zh.** Management stepper of 3d – printer [electronic resource] / Zh. Batyrkanov, K. Kadyrkulova, Sh. Belialov // The international Journal of Engineering and Science, V.5, Iss. 11. India, 2016. – P. 16-21.

20. **Батырканов, Ж.И.** Синтез законов управления на основе компенсации внутренних и внешних сил [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова // Вестник науки КСТУ им. З. Алдамжар, №4. – Костанай, 2016. – С. 26-30.

21. **Батырканов, Ж.И.** Об одном подходе адаптивного управления траекторным движением [текст] / Ж.И. Батырканов, М.Ф. Баймухамедов, К.К. Кадыркулова // Известия КГТУ им. И. Раззакова, № 1(41). Часть 2. – Бишкек, 2017. – С. 110 – 117.

22. **Батырканов, Ж.И.** Синтез алгоритмов управления шаговыми приводами 3D-принтера по осуществлению предписанных движений [Электронный ресурс] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова, Ш.А. Белялов // Вестник Мордовского университета, № 15. – Саранск, 2017.

23. **Батырканов, Ж.И.** Синтез законов управления шаговыми электроприводами 3-х звенного манипулятора [текст] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова, И.М. Маматбеков // Известия КГТУ им. И. Раззакова, № 1(45). – Бишкек, 2018. – С. 19-24.

24. **Батырканов, Ж.И.** Разработка системы управления шаговыми приводами 3-х звенного манипулятора [Электронный ресурс] / Ж.И. Батырканов, К.К. Кадыркулова, И.М. Маматбеков // Вестник Мордовского университета, №13. – Саранск, 2019.

Кадыркулова Кыял Кудайбердиевнанын

05.13.06–“Технологиялык процесстерди жана өндүрүштү автоматташтыруу жана башкаруу” адистиги боюнча “Объектинин траектордук кыймылынын башкаруу системин синтездөө” аттуу темасындагы аткарылган диссертациясынын

Кыскача мазмуну

Негизги сөздөр: өндүрүштүк робот, 3D-принтер, 3D-технология, синтез, кадамдык кыймылдаткыч, берилген траектория.

Изилдөөнүн объектиси: объектинин траектордук кыймылынын башкаруу системи.

Изилдөөнүн максаты: берилген траектория боюнча объектинин кыймылын ишке ашыруунун башкаруу законун синтездөө.

Изилдөө ыкмалары: алдыга коюлган маселени чечүүдө динамиканын тескери маселелер түшүнүк идеасы колдонулду. Туруктуулук теориясынын элементтери колдонулду.

Иштин негизги натыйжалары: Берилген траектория боюнча объектинин кыймылынын ишке ашыруусунда, башкаруунун синтезинин жаңы ыкмасы иштелип чыкты. Мында берилген траектория аналитикалык көрүнүштө жана берилген траектория таблица формасында синтездөө ыкмалары иштелип чыкты. Объект параметрикалык таасирине дуушар болгондо, ылайыктануучу башкаруунун синтездөө ыкмасы иштелип чыкты. 3D-принтерди башкаруулуучу объект катарында каралганда жана берилген траектория таблица формасында болгон учурга, 3D-принтеринин приводунун математикалык модели иштелип чыгарылды.

Изилдөөнүн натыйжаларын колдонуу: Изилдөөнүн натыйжалары 3D-принтерде жана өндүрүштүк роботтордун кыймыл органдарын башкаруу системин иштеп чыгууда кеңири колдонулат.

Изилдөөнүн натыйжалары «Робототехниканын жана электроприводдун негиздери» сабагы боюнча лабораториялык базасын түзүүдө жана КМТУнун окуу процессиндеги лекцияларда колдонулган.

Изилдөөлөрдүн натыйжалары Билим берүү жана илим министерлигинин гранттык проектилеринде 2012 жылдан 2017 га чейн колдонулган.

Колдонуу тармагы: Изилдөөнүн натыйжалары өндүрүштүк роботторду ишке киргизүүдө жана 3D-технологияларынын ар кандай өндүрүштүккө киргизүүдө колдонулат.

РЕЗЮМЕ

диссертации Кадыркуловой Кыял Кудайбердиевны на тему: «Синтез системы управления траекторным движением объекта» на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Ключевые слова: промышленный робот, автоматизированная система, 3D-принтер, 3D-технология, синтез, шаговый двигатель, предписанная траектория.

Объект исследования: системы управления траекторным движением объекта.

Цель исследования: синтез законов управления по осуществлению движений объекта по предписанной траектории.

Методы исследования: при решении поставленных задач применялись идеи концепции обратных задач динамики. Применялись элементы теории устойчивости.

Основные результаты работы и их новизна: разработан новый подход к синтезу управления по осуществлению движения объекта по предписанной траектории. При этом, разработаны подходы к синтезу, когда предписанная траектория задаётся в аналитическом виде и когда предписанная траектория задана в табличной форме. В случае действия параметрических возмущений на объект разработана методика синтеза адаптивного управления.

Разработана математическая модель привода 3D-принтера, как объекта управления в случае задания предписанной траектории в табличной форме.

Использование результатов исследований: результаты исследований могут широко использоваться при разработке систем управления рабочими органами 3D-принтеров и промышленных роботов.

Результаты исследований использовались при создании лабораторной базы по курсу «Основы робототехники и электропривода», а также в лекционных курсах учебного процесса в КГТУ им. И. Раззакова.

Результаты исследований, также использовались при выполнении грантовых проектов МО и Н КР в 2012-2017гг.

Область применения: Результаты исследований могут широко использоваться при внедрении промышленных роботов и 3D-технологий в различные сферы производства.

RESUME

of Kadyrkulova Kyial on the theme: "Synthesis control system of the object by trajectory movement " for the degree of candidate technical sciences in the specialty 05.13.06 - "Automation and management of technological processes and production."

Keywords: industrial robot, automated system, 3D-printer, 3D-technology, synthesis, stepping motor, prescribed trajectory.

Object of the study: control system of the object by trajectory movement.

The purpose of the research: the synthesis of control laws for the implementation movements of the object along a prescribed trajectory.

Research methods: when solving the tasks were used, the ideas concept of the inverse problems of dynamics. Elements of the theory of sustainability were used.

The main results of the work: a new approach has been developed for the management of the movement of an object along a prescribed trajectory. At the same time, synthesis approaches have been developed, when the prescribed trajectory is specified in an analytical form and when the prescribed trajectory is specified in tabular form. In the case of the action of parametric perturbations on an object, a method of adaptive control synthesis has been developed.

A mathematical model of a 3D - printer drive has been developed as a control object in the case of specifying a prescribed trajectory in tabular form.

Using the results of the study: research results can be widely used in the development of control systems for working bodies of 3D - printers and industrial robots.

The research results were used to create a laboratory base for the course "Fundamentals of Robotics and Electric Drive", as well as in lecture courses of the educational process at KSTU. I. Razzakov.

The research results were also used in the implementation of the grant projects of the Ministry of Education and Science 2012-2017.

Scope: The research results can be widely used in the implementation of industrial robots and 3D-technologies in various areas of production.

Подписано к печати 27.05.2019
Формат 60x84/16, объем 1,6 п. л.
Бумага офсет., тираж 50 экз.

ЧП «Сарыбаев Т.Т.».
г. Бишкек, ул. Раззакова, 49
т. 62-67-76