

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н. М. Матвейчук

**ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.
КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по образованию в области автоматизации технологических процессов,
производств и управления в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования по специальности
6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств»,
профилизация «Автоматизация и роботизация в АПК»*

Минск
БГАТУ
2025

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7
М33

Рецензенты:
кафедра экономической информатики
УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»
(кандидат экономических наук, доцент,
заведующий кафедрой *А. А. Ефремов*);
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник
лаборатории математической кибернетики
ГНУ «Объединенный институт проблем информатики
НАН Беларуси» *Ю. Н. Сотсков*

Матвейчук, Н. М.

М33 Теория автоматического управления. Курсовое проектирование : учебно-методическое пособие / Н. М. Матвейчук. – Минск : БГАТУ, 2025. – 68 с.
ISBN 978-985-25-0301-3.

Представлены методические рекомендации по выполнению курсовой работы: разработка математической модели объекта управления, определение передаточных функций объекта управления, составление схем синтезируемой системы, моделирование характеристик объекта управления с использованием пакета MATLAB, определение параметров регулятора; рассмотрены различные объекты управления; в приложении приведен пример выполненной работы.

Для студентов учреждений высшего образования по специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств», профилизация «Автоматизация и роботизация в АПК».

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7

ISBN 978-985-25-0301-3

© БГАТУ, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Цель, задачи и тематика курсовой работы.....	5
Структура и содержание курсовой работы	7
Методические рекомендации по выполнению курсовой работы.....	11
Требования к оформлению курсовой работы	38
Список рекомендуемых источников.....	43
Приложение А.....	45

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение курсовой работы по дисциплине «Теория автоматического управления» направлено на формирование умения самостоятельно получать, перерабатывать и использовать теоретические знания для решения задачи синтеза систем автоматического управления технологическими процессами сельскохозяйственного производства.

Теория автоматического управления является отраслью науки, в которой рассматриваются проблемы построения систем автоматического управления техническими объектами вне зависимости от их физической природы (механическими, электромеханическими, тепловыми, химико-технологическими и т. п.). Системы автоматического управления обеспечивают оптимизацию хода технологических процессов. За счет этого наиболее эффективно используются все виды ресурсов, повышается качество и увеличивается количество продукции, обеспечивается безопасность производства, повышается производительность труда. Управление техническим объектом состоит в выработке команд, реализация которых обеспечивает целенаправленное изменение состояния этого объекта при соблюдении заранее обусловленных требований и ограничений. Системы автоматического управления являются системами взаимодействующих между собой объекта управления и автоматического управляющего устройства (регулятора). В процессе работы регулятор получает текущую информацию о цели управления, а также информацию о текущем состоянии объекта и среды его функционирования и в соответствии с этой информацией формирует управляющие воздействия на объект так, чтобы была достигнута цель управления. При этом важным является характер преобразования сигналов объектами управления.

ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Целью выполнения курсовой работы является развитие у студентов навыков самостоятельной творческой работы, овладение методами современных научных исследований, углубленное изучение математического описания звеньев и систем автоматического управления, постановка и решение задачи синтеза системы автоматического управления.

Задачами курсовой работы как этапа подготовки к дипломному проектированию являются:

- освоение, углубление, обобщение и проверка теоретических знаний и практических навыков разработки и анализа систем автоматического управления;
- формирование умений использовать справочную литературу, нормативную, правовую, нормативно-техническую документацию, осуществлять патентный поиск.

Тематика курсовой работы

Курсовая работа посвящена *разработке и анализу системы автоматического регулирования*.

Регулирование является частным случаем управления. Система автоматического регулирования (САР) – замкнутые системы (работающие по отклонению или по принципу комбинированного управления), в которых управляемая величина стабилизируется, изменяется по заданной программе или в соответствии с произвольным, заранее не известным задающим воздействием.

Темы курсовой работы:

1. Разработка системы автоматического регулирования температуры в сушильном шкафу с двухпозиционным законом регулирования.
2. Разработка системы автоматического регулирования температуры в сушильном шкафу с пропорционально-интегральным законом регулирования.
3. Разработка системы автоматического регулирования температуры в сушильном шкафу с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования.
4. Разработка системы автоматического регулирования температуры в сушильном шкафу с помещенной в него емкостью с водой с пропорциональным законом регулирования.
5. Разработка системы автоматического регулирования температуры в сушильном шкафу с помещенной в него емкостью с водой с интегральным законом регулирования.
6. Разработка системы автоматического регулирования температуры в сушильном шкафу с помещенной в него емкостью с водой с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования.

7. Разработка системы автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением сверху с пропорционально-интегральным законом регулирования.
8. Разработка системы автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением сверху с двухпозиционным законом регулирования.
9. Разработка системы автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением сверху с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования.
10. Разработка системы автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением снизу с пропорциональным законом регулирования.
11. Разработка системы автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением снизу с двухпозиционным законом регулирования.
12. Разработка системы автоматического регулирования уровня воды в верхнем резервуаре с заполнением снизу с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования.
13. Решение задачи управления механизмами манипуляции по захвату детали.
14. Решение задачи управления механизмами манипуляции при выдвигении цилиндров.
15. Решение задачи управления механизмами манипуляции при повороте цилиндров.
16. Решение задачи управления механизмами манипуляции при выдвигении цилиндров с задержкой.
17. Решение задачи управления механизмами манипуляции при последовательном переносе детали.
18. Разработка системы автоматического управления продольным движением самолета с автопилотом.
19. Разработка системы автоматического управления стабилизацией самолета с автопилотом.
20. Разработка следящей системы с асинхронным двухфазным двигателем.

В задании на курсовую работу приведены: объект управления, управляемая величина, значение которой необходимо стабилизировать, вид типового звена, которым описывается объект управления, и закон регулирования, в соответствии с которым должна быть синтезирована система автоматического регулирования. Номинальное значение управляемой величины равно 1 (для всех вариантов), возмущающего воздействия – 0,5 единиц.

Полностью исходные данные для курсовой работы приводятся в индивидуальном задании на курсовую работу, которое выдается преподавателем (пример задания на курсовую работу приведен в приложении А).

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Структура курсовой работы определяется учебной программой дисциплины и должна включать следующие элементы (материалы приведены в порядке их расположения):

- титульный лист;
- задание;
- реферат;
- содержание;
- введение;
- текст расчетно-пояснительной записки с иллюстративным материалом, таблицами, графиками и т. п.;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

Общий объем курсовой работы составляет 20–25 машинописных страниц.

Способ выполнения текстовых материалов – машинописный (основной) с применением выходных печатающих устройств ЭВМ. При этом рекомендуется, набирая текст в текстовом редакторе Word, использовать шрифт Times New Roman размером 14 pt (пунктов) с полуторным интервалом, выравнивание – по ширине, абзацный отступ – 1,25 см.

1. **Титульный лист** является первой страницей расчетно-пояснительной записки. Выполняется на бланке установленной формы. На титульном листе рамки не выполняются, штамп основной надписи не приводят.

2. **Задание на проектирование** является главным руководством, на основании которого разрабатывается проект. Задание выполняется на бланке установленного образца, который выдается руководителем курсового проекта (работы), и утверждается заведующим кафедрой. При получении задания студент ставит на нем свою подпись. Форма задания на курсовой проект (курсовую работу) приведены в учебном пособии [21].

3. **Реферат** – краткая характеристика выполненного проекта, предназначенная для предварительного ознакомления с проектом и отражающая основное содержание работы с точки зрения ее достоинств и достижения цели, поставленной в теме проекта.

Текст реферата пишется на стандартном листе, оформленном рамкой. Основную надпись на данном листе не помещают. Номер страницы не проставляют.

Заголовок «Реферат» пишется с прописной буквы и располагается на отдельной строке симметрично тексту. Объем реферата – не более одной страницы.

Вначале указывают объем проектной документации: перечисляют общий объем текстовых материалов с указанием числа иллюстраций (эскизов, рисунков, таблиц и т. п.); указывают объем графической части проекта; указывают количество использованных источников. Далее приводят ключевые слова. Перечень ключевых слов должен включать от 5 до 15 слов или словосочетаний из текста расчетно-пояснительной записки, которые в наибольшей степени характеризуют содержание. Ключевые слова приводятся в именительном падеже и записываются строчными буквами в строку через запятые после слов «Ключевые слова». Затем дают краткое содержание проекта (работы), отражающее цель работы, методы разработки, принятые решения, приводят итоговые результаты и основные показатели, указывают возможности внедрения основных результатов проекта.

Образец реферата приведен в учебном пособии [21].

4. **Содержание** предназначено для облегчения поиска необходимых материалов при чтении записки, а также для общего ознакомления с работой и представления об объемах всех разделов. Содержание начинает текстовую часть расчетно-пояснительной записки. Его размещают сразу после листа реферата с новой страницы и при необходимости продолжают на последующих листах. Слово «Содержание» пишут с прописной буквы посередине страницы. В содержании приводят порядковые номера и наименования разделов, подразделов и пунктов, имеющих наименование, а также приложения с их обозначениями и наименованиями. Указывается номер листа (страницы), на котором размещено начало материала (раздела, подраздела и т. п.). На первой странице содержания приводят основную надпись по форме, соответствующей основной надписи первого листа текстового материала. Пример оформления оглавления приведен в учебном пособии [21].

5. **Введение** характеризует современное содержание тех вопросов и проблем, которым посвящен курсовой проект (работа). Во введении нужно обосновать необходимость проведения именно этой работы, показать ее место в кругу аналогичных работ, актуальность и новизну разрабатываемой темы, цель проекта и ожидаемые результаты его выполнения.

6. **Текст расчетно-пояснительной записки.** Содержание разделов расчетно-пояснительной записки определяется заданием на курсовой проект. Оформление расчетно-пояснительной записки осуществляется в соответствии с учебным пособием [21].

7. **Заключение** должно отражать основные результаты работы, выводы и предложения.

8. **Список использованных источников.** Составление списка использованных источников является завершением курсового проекта (работы), основой для которого служат записи всех просмотренных и изученных книг, статей из сборников и журналов и других материалов.

Как правило, используется алфавитный способ группировки материала в списках, когда источники группируют в алфавитном порядке записей. В начале списка размещаются по алфавиту книги, а затем – статьи из журналов и сборников. При этом иностранные источники размещают по алфавиту после перечня всех источников на языке выполняемой работы.

Библиографический указатель использованной при выполнении литературы дается на отдельной странице (страницах) под заголовком «Список использованных источников». Заголовок порядкового номера не имеет.

В список включают только те источники, на которые в тексте расчетно-пояснительной записки имеется ссылка. Каждый источник, включенный в список, нумеруют арабскими цифрами с точкой и записывают с новой строки.

Примеры записи литературных источников приведены в учебном пособии [21].

9. Приложения. Материал, дополняющий текст документа, допускается помещать в приложениях. Приложениями могут быть, например, графический материал, таблицы большого формата, расчеты, описания аппаратуры и приборов, описания алгоритмов и программ задач, решаемых на ЭВМ, и т. д.

Приложения оформляют как продолжение записки на последующих ее листах.

В тексте записки на все приложения должны быть даны ссылки. Приложения располагают в порядке ссылок на них в тексте записки.

Расчетно-пояснительная записка должна быть сброшюрована – выполнена в папке со скоросшивателем и прозрачной первой страницей.

Содержание расчетно-пояснительной записки к курсовой работе должно соответствовать пунктам исследования, приведенным в задании на курсовую работу. Например, в случае, когда объектом управления является сушильный шкаф или станция водоснабжения, основная часть курсовой работы должна включать следующие разделы:

1. Исходные данные.
2. Разработка математической модели объекта управления и ее линеаризация.
3. Решение дифференциального уравнения, описывающего объект управления, и определение передаточных функций объекта управления.
4. Экспериментальное определение численных значений параметров передаточных функций объекта управления.
5. Моделирование переходных характеристик объекта управления.
6. Разработка функциональной и структурной схем системы автоматического регулирования и постановка задачи синтеза.
7. Определение параметров регулятора с применением последовательного симплекс-метода.
8. Моделирование переходных характеристик системы автоматического регулирования и определение показателей качества регулирования.

Для случая, когда объектом управления является механизм манипуляции, пример содержания расчетно-пояснительной записки приведен в приложении А.

Графическая часть курсовой работы должна включать три-четыре листа формата А4.

Для случая, когда объектом управления является сушильный шкаф или станция водоснабжения, на листах графической части должны быть представлены:

- функциональная схема системы автоматического регулирования;
- структурная схема системы автоматического регулирования;
- компьютерная динамическая модель системы автоматического регулирования в среде Simulink.

Для случая, когда объектом управления является механизм манипуляции, на листах графической части должны быть представлены:

- кинематическая модель механизма манипуляции;
- структурная схема системы автоматического регулирования в виде компьютерной динамической модели в среде Simulink;
- графики изменения координат элементов механизма манипуляции.

В случае исследования асинхронной следящей системы на листах графической части должны быть представлены:

- функциональная схема системы автоматического регулирования;
- структурная схема системы автоматического регулирования;
- графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ системы автоматического регулирования.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Разработка систем автоматического регулирования температуры сушильного шкафа или уровня воды

Приведем краткое описание каждого раздела *расчетно-пояснительной записки* к курсовой работе.

Исходные данные

В этом разделе должно быть приведено краткое описание объекта управления в соответствии с темой и заданием на курсовую работу (пример задания приведен в приложении А), приведен рисунок объекта управления, указаны управляемая z и управляющая x_1 величины, возмущающее воздействие x_2 , устройство управления (регулятор), алгоритм функционирования.

Например, для составления системы автоматического регулирования асинхронной следящей системы исходные данные включают принципиальную схему системы с асинхронным двухфазным двигателем и ее описание.

Исходные данные могут быть взяты из задания на курсовую работу.

Разработка математической модели объекта управления и определение передаточных функций объекта управления

В этом разделе составляется уравнение материального (теплового) баланса, на его основе разрабатывается нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее рассматриваемый процесс в объекте управления, следующего вида:

$$\frac{dz}{dt} = f(z, x_1, x_2). \quad (1)$$

Определяется рабочая точка для статического режима (исходя из условия)

$$z = z^0 = \text{const}, \quad x_1 = x_1^0 = \text{const}, \quad x_2 = x_2^0 = \text{const}$$

и рассматривается статический режим вблизи рабочей точки, при этом $\frac{dz}{dt} = 0$, т. е.

$$f(z_0, x_1^0, x_2^0) = 0.$$

Если полученное дифференциальное уравнение (1) является нелинейным, проводится его линеаризация вблизи рабочей точки:

$$\begin{aligned}z^* &= z - z_0, \\x_1^* &= x_1 - x_1^0, \\x_2^* &= x_2 - x_2^0.\end{aligned}$$

Тогда линеаризованное дифференциальное уравнение имеет вид:

$$\frac{dz^*}{dt} = az^* + b_1x_1^* + b_2x_2^*, \quad (2)$$

где $a = \left. \frac{\partial f}{\partial z} \right|_0$, $b_1 = \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_0$, $b_2 = \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_0$.

Окончательно выражение (1) может быть преобразовано к следующему виду:

$$T \frac{dz^*}{dt} + z^* = K_1x_1^* + K_2x_2^*, \quad (3)$$

где $T = -\frac{1}{a}$ – постоянная времени объекта, с;

$K_1 = -\frac{b_1}{a}$, $K_2 = -\frac{b_2}{a}$ – коэффициенты преобразования (усиления) объекта,

размерности которых равны отношению размерностей выходной и входной величин объекта.

Далее следует решить полученное линейное дифференциальное уравнение при заданных входных воздействиях, чтобы получить переходные характеристики объекта по управляющему и возмущающему воздействиям и определить передаточные функции объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям.

Решение полученного дифференциального уравнения – изменение со временем управляемой величины $z^* = z^*(t)$ – зависит от того, какой вид имеют входные сигналы: изменение во времени управляющего воздействия $x_1^* = x_1^*(t)$ и возмущающего воздействия $x_2^* = x_2^*(t)$.

В качестве типового входного воздействия рассматривается ступенчатое воздействие, которое математически описывается следующим образом:

$$u(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ u_0 & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Переходная функция (переходная характеристика) объекта управления – это график изменения управляемой величины объекта управления при ступенчатом изменении задающего либо возмущающего воздействий. Соответственно, рассматривают обычно две переходных функции: переходную функцию объекта управления по управляющему воздействию и переходную функцию по возмущающему воздействию.

При получении переходной функции объекта управления по управляющему воздействию принимается, что изменение управляющего воздействия на объект $x_1^* = u(t)$ из (4), а изменение возмущающего воздействия на объект $x_2^* = 0$. При этих условиях производится решение линеаризованного дифференциального уравнения, и полученное решение представляет собой переходную характеристику объекта по управляющему воздействию.

При получении переходной характеристики объекта управления по возмущающему воздействию принимается, что изменение управляющего воздействия на объект $x_1^* = 0$, а изменение возмущающего воздействия на объект $x_2^* = u(t)$. При этих условиях также производится решение линеаризованного дифференциального уравнения, и полученное решение представляет собой переходную характеристику объекта по возмущающему воздействию.

Далее с использованием преобразования Лапласа находятся передаточные функции объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям:

$$W_u^{OY} = \frac{z^*(s)}{x_1^*(s)},$$

$$W_F^{OY} = \frac{z^*(s)}{x_2^*(s)}.$$

В завершении раздела делается вывод о типе линейного звена, которому соответствует рассматриваемый объект управления по управляющему и по возмущающему воздействиям.

Экспериментальное определение численных значений параметров передаточных функций объекта управления

Вначале следует указать, значения каких физических величин требуется определить для получения численных значений параметров передаточных функций объекта управления, и экспериментально определить значения этих величин путем измерения параметров учебной лабораторной установки.

Путем подстановки определенных экспериментально численных значений всех параметров объекта управления определяются численные значения коэффициентов линеаризованного дифференциального уравнения объекта управления, после чего следует записать итоговые выражения для переходных и передаточных функций объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям.

В качестве метода определения искомых значений параметров допускается использовать идентификацию.

Идентификацией называют получение математических моделей на основании совместного анализа входных и выходных сигналов объекта.

Выполним приближенную идентификацию сушильного шкафа по виду его переходной функции (т. е. реакции объекта на ступенчатое входное воздействие). Данный подход включает в себя следующие шаги:

1. На вход объекта подается *ступенчатое воздействие* и регистрируется изменение во времени выходного сигнала $y(t)$. В нашем случае изучаемым объектом является сушильный шкаф с электронагревателем внутри. В некоторый начальный момент времени $t = 0$ электронагреватель включается, при этом выделяемая им тепловая мощность скачкообразно изменяется от 0 Вт до приблизительно 100 Вт. Температура θ внутри сушильного шкафа начинает повышаться, ее значение измеряется через равные промежутки времени (например, каждые 3 с), результаты измерений заносятся в таблицу. После окончания измерений по полученным данным строится график переходной функции объекта, т. е. график изменения во времени температуры внутри сушильного шкафа относительно ее начального значения: $y(t) = \theta(t) - \theta_{t=0}$.

2. По виду полученной экспериментально переходной функции $y(t)$ определяется *вид линейного звена*, теоретическая переходная функция которого по форме наиболее близка к экспериментальной переходной функции $y(t)$.

3. Для выбранного вида звена по графику экспериментальной переходной функции определяются *оценки численных значений параметров* передаточной функции выбранного звена.

Значения постоянной времени находятся путем построения касательных к графику: в начале координат – для апериодического звена первого порядка; в точке

начала изменения выходной величины – для апериодического звена первого порядка с запаздыванием; в точке перегиба – для апериодического звена второго порядка.

После этого следует провести компьютерное моделирование объекта управления в системе компьютерного моделирования Simulink с подачей на вход управляющего и возмущающего воздействий и получить графики переходных функций объекта управления по управляющему и возмущающему воздействиям.

Simulink представляет собой интерактивную программу для математического моделирования и анализа динамических систем и устройств. Simulink основывается на принципе визуального программирования, в соответствии с которым пользователь создает модель системы в виде структурной схемы из библиотеки стандартных блоков. Таким образом, пользователю нет необходимости изучать язык программирования и численные методы. При моделировании система выполняет необходимые вычисления в соответствии с заданными настройками и представляет результаты в виде графиков и таблиц.

При запуске пакета Simulink из системы MATLAB открывается Simulink Library Browser – окно интегрированного обозревателя (браузера) библиотеки стандартных блоков Simulink (показано на рисунке 1). В этом окне содержится дерево компонентов библиотеки блоков Simulink. Библиотека блоков включает следующие основные разделы:

- Continuous – линейные непрерывные блоки;
- Discontinuities – нелинейные блоки;
- Discrete – дискретные блоки;
- Math operations – блоки математических операций;
- Signal routing – блоки преобразования сигналов;
- Sinks – регистрирующие блоки (приемники сигналов);
- Sources – источники сигналов.

Для просмотра того или иного раздела библиотеки достаточно выделить его мышью – в правой части окна Simulink Library Browser появится набор пиктограмм блоков активного раздела библиотеки.

В окне редактирования графической модели моделируемой системы или устройства следует создать модель исследуемого объекта управления в виде звена с полученной передаточной функцией (отдельно по управляющему и возмущающему воздействиям), источника входного сигнала и осциллографа. Это делают следующим образом.

В окне Simulink Library Browser в библиотеке SimPowerSystems на вкладке Continuous находят блок Transfer Fcn (звено, заданное передаточной функцией) и, выделив его левой клавишей мыши, перетаскивают в окно модели.

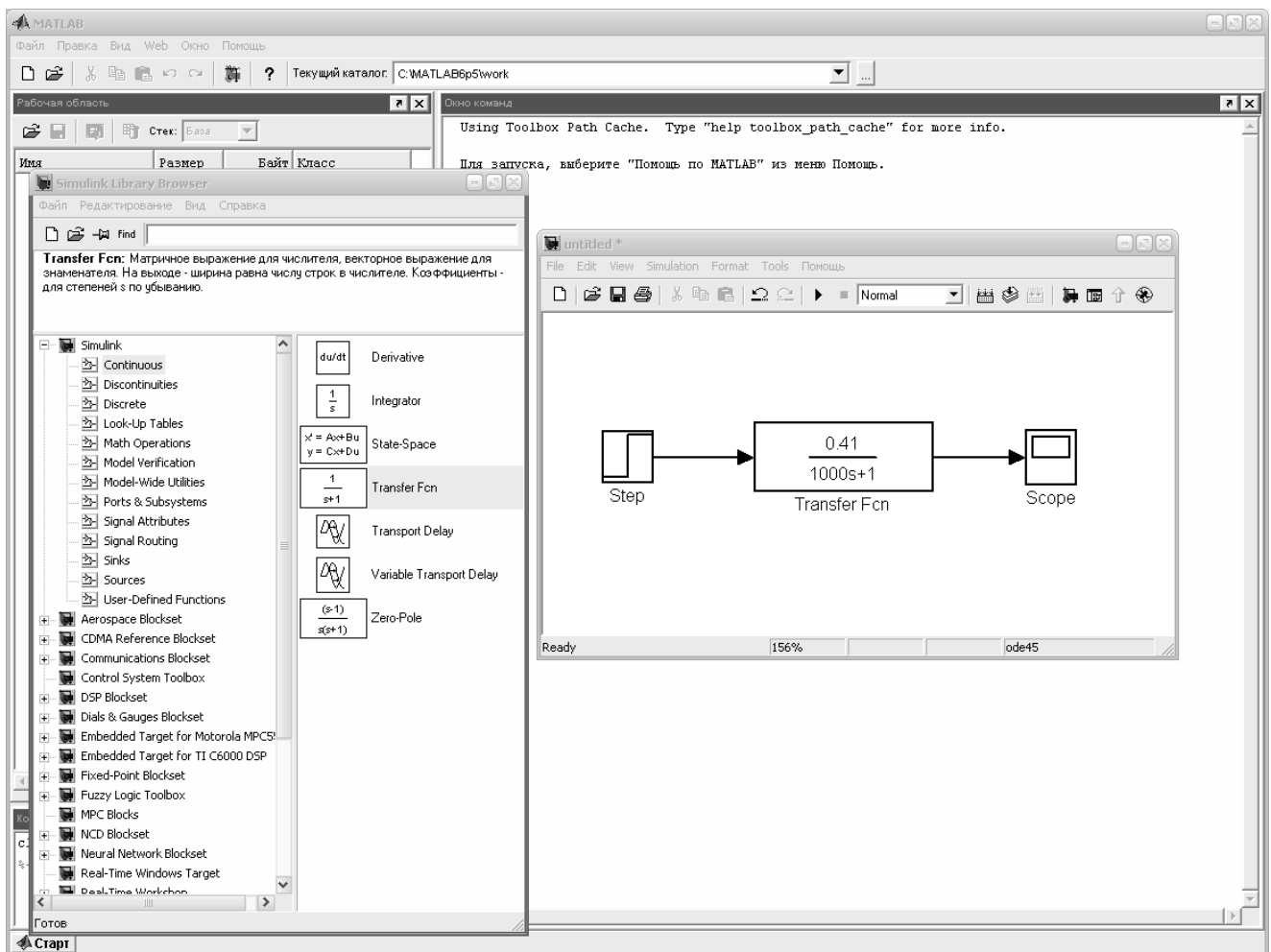


Рисунок 1 – Модель объекта управления с управляющим воздействием в среде Simulink

Для моделирования подачи на вход системы ступенчатого задающего воздействия используют компонент Step, находящийся в библиотеке Simulink на вкладке Sources (вкладка содержит компоненты, моделирующие различные источники сигналов). Компонент выделяют левой клавишей мыши и перетаскивают в окно модели, расположив слева от блока Transfer Fcn. Для отображения в виде графика изменений сигналов задающего воздействия и управляемой величины используют компонент Scope, находящийся на вкладке Sinks (компоненты отображения и регистрации сигналов). Компонент выделяют левой клавишей мыши и перетаскивают в окно модели, расположив справа от блока Transfer Fcn.

Соединяют блоки. Подводят курсор мыши к выходу блока Step (значку $>$) и, нажав на левую клавишу мыши, соединяют выход блока Step со входом блока Transfer Fcn. Аналогично соединяют выход блока Transfer Fcn со входом блока Scope.

Перед началом процесса моделирования следует задать параметры моделирования. Для этого в меню окна редактирования модели выполняют команду Simulation→Simulation parameters и в появившемся диалоговом окне задания параметров на вкладке Solver устанавливают такое значение Stop time (конечный момент

времени), чтобы время моделирования было больше времени окончания переходного процесса.

Запуск **процесса моделирования** выполняется командой Simulation→Start. По окончании процесса моделирования в окне Scope отобразится график изменения управляемой величины.

Для анализа динамических характеристик линейных САУ в Simulink имеется специальный компонент – LTI Viewer. С его помощью можно быстро и легко рассчитывать временные (переходная функция, импульсная переходная функция, перерегулирование, время регулирования, статическая ошибка регулирования) и частотные (АЧХ, ФЧХ, годограф Найквиста) характеристики моделируемой САУ.

С помощью компонента LTI Viewer получают переходную функцию исследуемого объекта управления по задающему воздействию. Для этого сначала в окне редактирования модели отключают компонент Step от входа звена и добавляют в модель два элемента: блок In1, находящийся в библиотеке Simulink на вкладке Sources, и блок Out1, находящийся в библиотеке Simulink на вкладке Sinks. Это метки для указания входной и выходной точек системы. Выход блока In1 следует соединить со входом объекта управления, а вход блока Out1 – с выходом объекта управления. Затем выполняют команду меню Tools→Linear analysis. В результате этого на экране появляется окно LTI Viewer, в котором будет отображен график переходной функции. Следует перейти в окно LTI Viewer, щелкнуть правой кнопкой мыши и во всплывающем меню выбрать пункт Plot types→Step. Для получения графика переходной функции САУ выполнить в этом же окне команду меню Simulink→Get Linearizes Model.

По полученному графику можно найти показатели качества переходных функций объекта управления. Для этого на свободном пространстве окна LTI Viewer с полученным графиком нужно нажать на правую клавишу мыши и во всплывающем меню выбрать пункты Characteristics→Peak Response (для определения перерегулирования), Characteristics→Settling Time (для определения времени регулирования) и Characteristics→Steady State (для определения установившегося значения). В результате на графике будут отмечены соответствующие точки. При наведении указателя мыши на точку появится всплывающее окно с данными.

Разработка функциональной и структурной схем системы автоматического регулирования и постановка задачи синтеза

Функциональная схема системы – это наглядное графическое изображение системы в виде взаимосвязанных элементов, выполняющих определенную функцию. Элементы функциональной схемы изображаются прямоугольниками, а связи

между ними – линиями со стрелками, соответствующими направлению прохождения сигнала. Над линиями связи указывают обозначение сигнала. Наименование элемента в сокращенной форме указывается внутри соответствующего прямоугольника.

Для разработки функциональной схемы нужно перечислить все функциональные блоки, входящие в разрабатываемую систему, определить связи между ними и линии передачи сигналов. В каждой конкретной системе функциональные элементы представлены конкретными устройствами. Функциональная схема САР, как правило, включает в себя задатчик, устройство управления (регулятор), исполнительный механизм, датчик. Некоторые типовые функциональные элементы могут отсутствовать, а некоторые дополнительные устройства, такие как механизмы передачи движения, промежуточные преобразователи, устройства местной обратной связи и т. д., могут быть добавлены.

Сигналами являются задающее, возмущающее, управляющее воздействия, управляемая величина и т. д. В синтезируемой САР используется принцип управления по отклонению. Полученная функциональная схема приводится на листе 1 графической части курсовой работы.

В систему, как правило, включаются следующие функциональные блоки: объект управления, регулятор, сравнивающее устройство, датчик, задатчик.

Структурной схемой называется наглядное графическое изображение математической модели (математического описания) системы.

При математическом описании систему разбивают на отдельные звенья направленного действия, передающие воздействия только в одном направлении со входа на выход.

На структурной схеме каждое звено изображается прямоугольником, внутри которого записывается математическое описание звена (для линейных звеньев – передаточная функция). Связи между звеньями структурной схемы изображаются линиями со стрелками, соответствующими направлению прохождения сигналов. Над линиями ставятся обозначения сигналов.

Элементы, осуществляющие сложение и вычитание сигналов на структурной схеме, изображают в виде окружностей. Над стрелкой проставляют знак сигнала. Иногда окружность разбивают на секторы, тогда сектор, к которому подходит вычитаемый сигнал, затушевывают. Примеры оформления приведены на рисунке 2. Кроме того, устройства сравнения (блоки сравнения) обозначают в виде сумматора, как на рисунке 2, д. Знак «+» иногда не ставится.

Полученная структурная схема приводится на листе 2 графической части курсовой работы.

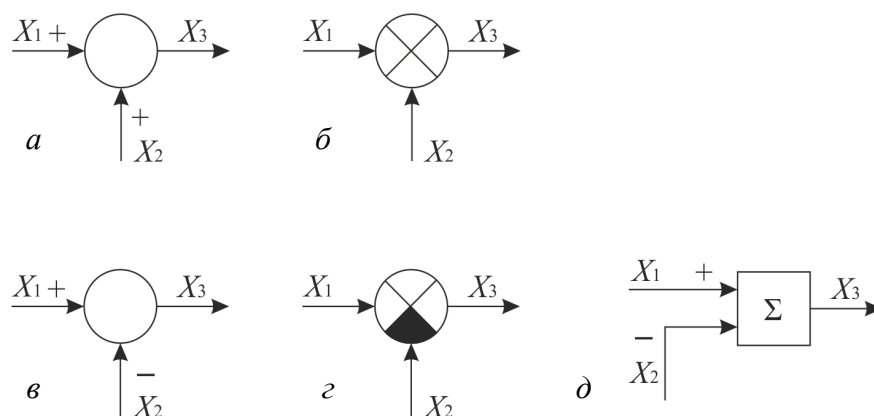


Рисунок 2 – Примеры оформления элементов сложения (*a*, *б*) и вычитания (*в*, *г*, *д*) сигналов на структурной схеме

Для составления структурной схемы (по известной функциональной схеме) нужно знать передаточные функции всех элементов, входящих в рассматриваемую систему. В нашем случае известными являются передаточные функции **объекта управления** как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям (находятся при выполнении раздела 4 курсовой работы), и, поскольку закон регулирования задан по условию, известен также общий вид передаточной функции **управляющего устройства**.

Рассмотрим передаточные функции наиболее часто используемых законов регулирования.

Закон регулирования – это математическая зависимость между сигналом рассогласования (ошибкой) $e(t)$ (входным сигналом регулятора) и управляющим воздействием на объект $U(t)$ (выходным сигналом регулятора) без учета инерционности регулятора и элементов исполнительного устройства:

$$U(t) = f(e(t)).$$

При **пропорциональном законе регулирования** математическая зависимость между сигналом ошибки $e(t)$ и управляющим воздействием на объект $U(t)$ имеет следующий вид:

$$U(t) = K_p e(t),$$

т. е. вырабатываемый регулятором управляющий сигнал пропорционален сигналу ошибки. Соответственно, *передаточная функция регулятора*

$$W_{\text{рег}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_p. \quad (5)$$

При **интегральном законе регулирования** сигнал ошибки $e(t)$ и управляющее воздействие на объект $U(t)$ связаны следующим соотношением:

$$U(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau,$$

где K_i – некоторый постоянный коэффициент интегрирования. *Передающая функция регулятора*

$$W_{\text{пер}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_i \frac{1}{s}. \quad (6)$$

Пропорционально-интегральный закон регулирования формирует управляющий сигнал с учетом значения сигнала ошибки и интеграла от сигнала ошибки. Формула управляющего воздействия на объект имеет следующий вид:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau,$$

т. е. вырабатываемый регулятором управляющий сигнал пропорционален сигналу ошибки и интегралу от ошибки. Тогда *передающая функция регулятора*

$$W_{\text{пер}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s}. \quad (7)$$

При формировании управляющего сигнала в соответствии с **пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования** (ПИД-законом) учитываются:

- значение сигнала ошибки;
- интеграл от сигнала ошибки;
- скорость изменения (производная) сигнала ошибки:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}.$$

Передающая функция регулятора

$$W_{\text{пер}}(s) = \frac{U(s)}{e(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s. \quad (8)$$

Позиционными называются регуляторы, выходной сигнал u которых (сигнал управления) имеет несколько фиксированных значений, и переход с одного на другое происходит скачком.

На структурных схемах внутри прямоугольника, соответствующего позиционному элементу, изображается его статическая характеристика.

Позиционные регуляторы обязательно включают в себя так называемые элементы прерывного действия, а именно релейные элементы. Статические характеристики, связывающие входной и выходной сигналы наиболее распространенных релейных элементов, приведены на рисунке 3. Реле с характеристикой рисунка 3, *а* называют **идеальным**, с характеристикой рисунка 3, *б* – реле **с зоной неоднозначности** ($\pm a$).

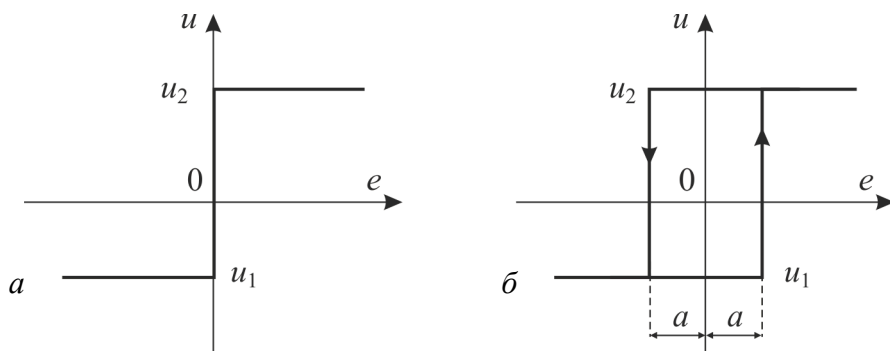


Рисунок 3 – Статические характеристики релейных элементов

После разработки структурной схемы для дальнейшего исследования нужно построить **компьютерную динамическую модель САР в среде Simulink**. Полученная модель приводится на листе 3 графической части курсовой работы.

Формулировка задачи синтеза системы автоматического регулирования и определение параметров регулятора с применением последовательного симплекс-метода

Задача синтеза системы автоматического регулирования в общем виде выглядит следующим образом: синтезировать САР заданной величины с заданным законом регулирования, минимизирующую (максимизирующую) некоторый критерий при выполнении некоторых ограничений. Управляемая величина и закон регулирования заданы по условию, а ограничения, как правило, накладываются на перерегулирование, время регулирования или ошибку регулирования. В качестве критерия можно выбрать оптимизацию одной из этих величин или интегральный квадратичный критерий качества регулирования.

Для решения задачи синтеза требуется определить оптимальные параметры устройства управления (регулятора), осуществляющего регулирование в соответ-

ствии с заданным законом регулирования. Различные законы регулирования имеют различное количество параметров, которые необходимо оптимизировать.

При **пропорциональном законе регулирования** регулятор представлен передаточной функцией (5) и имеет один параметр – коэффициент пропорциональности K_p .

При **интегральном законе регулирования** регулятор представлен передаточной функцией (6) и также имеет один параметр – коэффициент интегрирования K_i .

При **пропорционально-интегральном законе регулирования** регулятор представлен передаточной функцией (7) и имеет уже два параметра – коэффициент пропорциональности K_p и коэффициент интегрирования K_i .

При формировании управляющего сигнала в соответствии с **пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования** (ПИД-законом) регулятор представлен передаточной функцией (8) и имеет три параметра – коэффициент пропорциональности K_p , коэффициент интегрирования K_i и коэффициент дифференцирования K_d .

Параметрами настройки **двухпозиционного** регулятора (пример математического описания – (4)) являются заданное значение регулируемой величины Y_3 и полуширина зоны неоднозначности a . Следовательно, при двухпозиционном законе регулирования регулятор также имеет два параметра.

Далее требуется определить оптимальное значение параметров регулятора (от одного до трех в соответствии с заданным законом регулирования) с выбранным шагом изменения параметров в соответствии с поставленной задачей синтеза САР.

Для нахождения искомого оптимального значения параметра используется **последовательный симплекс-метод**.

Эксперимент, проводимый с помощью последовательного симплекс-метода, заключается в построении начального симплекса и проведении опытов с вычислением значений критерия во всех вершинах построенного симплекса. Затем производится выбор отбрасываемой вершины симплекса (в которой значение критерия приняло наихудшее значение) и достроение второго симплекса путем выбора новой точки взамен отброшенной. В новой точке проводится опыт, вычисляется значение критерия, и оценка точек повторяется для второго симплекса. Таким образом проводится последовательное перемещение в точку, в которой критерий принимает оптимальное значение.

Для построения начального симплекса нужно задать начало координат и шаг варьирования по каждой переменной. Если выбрать систему координат, то точки, задающие вершины симплекса, можно записать в таблицу (матрицу).

Построение начального симплекса проводится в кодированных координатах. В кодированных координатах одна из вершин совпадает с началом координат, а шаг варьирования равен единице.

Если производится поиск оптимального значения **одного фактора** (обозначим его x), то симплекс-план содержит **две вершины** (нужно провести два опыта). В таблице 1 представлен начальный симплекс-план в кодированных координатах.

Таблица 1 – Начальный симплекс-план для одного фактора

Номер точки	x
1	0
2	1

Если производится поиск оптимального значения **двух факторов** (x_1, x_2), то симплекс-план содержит **три вершины** (нужно провести три опыта). Координаты начального симплекс-плана в кодированных координатах представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Начальный симплекс-план для двух факторов

Номер точки	x_1	x_2
1	0	0
2	1	0
3	0,50	0,86

Если производится поиск оптимального значения **трех факторов** (x_1, x_2, x_3), то симплекс-план содержит **четыре вершины** (нужно провести четыре опыта). Координаты начального симплекс-плана в кодированных координатах представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Начальный симплекс-план для трех факторов

Номер точки	x_1	x_2	x_3
1	0	0	0
2	1	0	-1
3	0	1	-1
4	1	0	0

После того как выбран план первого симплекса, следует провести опыты в соответствии с планом. опыты проводятся в вершинах симплекса, представленных натуральными координатами. Для перехода от кодированных координат к натуральным следует воспользоваться соотношением

$$\%_j = \%_j^0 + \Delta\%_j x_j, \quad (9)$$

где $\%_j^0$ – значение j -го фактора на нулевом уровне в натуральной системе координат;

x_j – значение j -го фактора в кодированной системе координат;

$\Delta\%_j$ – шаг варьирования j -го фактора.

Для определения предпочтительного направления движения к оптимуму следует сравнить между собой результаты опытов и указать наихудший из них.

Правило отражения: наихудшая вершина отражается относительно противоположной грани (для правильного симплекса).

Формула для отражения вершины:

$$\%_{j,N+1} = \frac{2}{k} \sum_{u=1}^k \%_{j,u} - \%_j^*, \quad (10)$$

где $N = k + 1$ – число точек в исходном симплексе, k – число факторов;

$\%_{j,N+1}$ – координата новой точки в натуральных координатах для фактора с номером j (суммирование ведется по всем опытам, кроме отвергнутого);

$\%_j^*$ – координата данного фактора в отвергнутом опыте.

Одной новой точки достаточно, чтобы получить снова симплекс (это справедливо для любого числа факторов). Следовательно, произведя только один новый опыт, мы получим новый симплекс, к которому опять можно применить правило отражения.

Последовательный симплекс-метод находит оптимум (с точностью до своих размеров) и заикликивается вокруг наилучшей точки.

Формальный **признак заикливания** – сохранение одной точки на протяжении $(k + 1)$ -го шага.

Таким образом, при выполнении работы по этому разделу:

- 1) следует определить количество оптимизируемых параметров и величину шага варьирования по каждому параметру;

- 2) в зависимости от параметров передаточной функции регулятора за основу берется одна из таблиц 1–3 и составляется таблица начального симплекса в натуральных координатах с использованием формул перехода (9);
- 3) полученная таблица дополняется столбцами критерия и условий;
- 4) проводится моделирование синтезируемой САР на учебной экспериментальной установке с определением значений критерия и условий и заполнением таблицы по результатам эксперимента во всех точках начального симплекса;
- 5) производится выбор отбрасываемой вершины симплекса (в которой значение критерия приняло наихудшее значение) и достроение второго симплекса путем выбора новой точки взамен отброшенной с использованием формул отражения (10);
- б) в новой точке проводится опыт, вычисляется значение критерия, и оценка точек повторяется для второго симплекса. Проводится последовательное перемещение в точку, в которой критерий принимает оптимальное значение;
- 7) проведение эксперимента завершается при заиклиивании симплекса вокруг наилучшей точки.

После нахождения наилучшей точки определяются соответствующие ей оптимальные значения параметров регулятора.

Моделирование переходных характеристик системы автоматического регулирования и определение показателей качества регулирования

При выполнении этого раздела курсовой работы производится получение графиков переходных характеристик синтезированной САР с найденными оптимальными значениями параметров регулятора с использованием учебных экспериментальных установок по изучению систем замкнутого регулирования.

По полученному графику переходной функции САР определяются значения показателей качества регулирования по следующим формулам:

– перерегулирование: $\sigma = \frac{h_{\max} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100 \%$;

– статическая ошибка регулирования: $e_{\text{ст}} = 1 - h_{\text{уст}}$;

– время регулирования: $t_{\text{рег}}$ – время от начала регулирования до момента, когда отклонение выходной величины от установившегося значения не превысит 5 %.

Делается вывод о качестве синтезированной системы.

В случае, когда рассматривается двухпозиционный закон регулирования, показателями качества регулирования являются период автоколебаний и значение максимального отклонения от заданного значения при автоколебаниях.

Решение задачи управления механизмами манипуляции

Разработка кинематической модели объекта управления

В мехатронике и робототехнике часто необходимо решать задачу поиска функциональной связи между координатами позиционирования актуатора x, y, z (например, захватного устройства робота) и координатами привода q_1, q_2, q_3 , которые называются обобщенными координатами (рисунок 4).

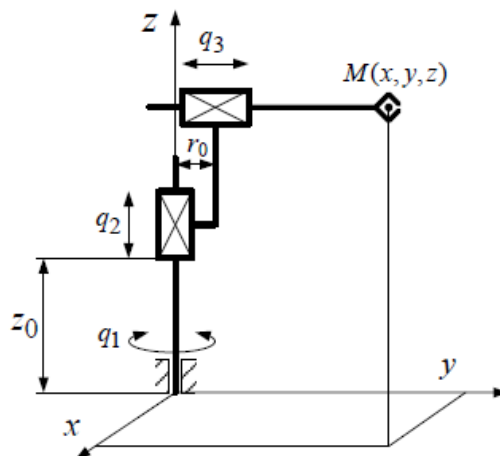


Рисунок 4 – Координаты актуатора и привода

Непосредственной задачей кинематики является определение функциональной зависимости между координатами положения исполнительного механизма x, y, z и обобщенными координатами привода q_1, q_2, q_3 :

$$x = f_1(q_1, q_2, q_3),$$

$$y = f_2(q_1, q_2, q_3),$$

$$z = f_3(q_1, q_2, q_3).$$

Здесь, учитывая обобщенные координаты привода q_1, q_2, q_3 , можно найти координаты точки позиционирования робота $M(x, y, z)$.

Обратной задачей кинематики является определение функциональной зависимости между обобщенными координатами привода q_1, q_2, q_3 и координатами положения привода x, y, z :

$$q_1 = F_1(x, y, z),$$

$$q_2 = F_2(x, y, z),$$

$$q_3 = F_3(x, y, z).$$

Обратная задача кинематики позволяет, используя заданные координаты позиционирования x , y , z , найти координаты привода q_1 , q_2 , q_3 . Задача прямой кинематики обычно используется для анализа траекторий робота и анализа ошибок позиционирования.

Для управления мехатронными и робототехническими системами важнее решение обратной кинематической задачи. Именно обратная задача кинематики позволяет получить функцию управления манипуляционным механизмом при заданных координатах позиционирования.

Прямые и обратные задачи кинематики могут решаться различными способами и методами. Чтобы понять, в каком конкретном случае следует применять конкретный метод решения, следует разделить все механические конструкции на два типа: механизмы с открытой кинематической цепью (рисунок 5, а) и замкнутой кинематической цепью (рисунок 5, б).

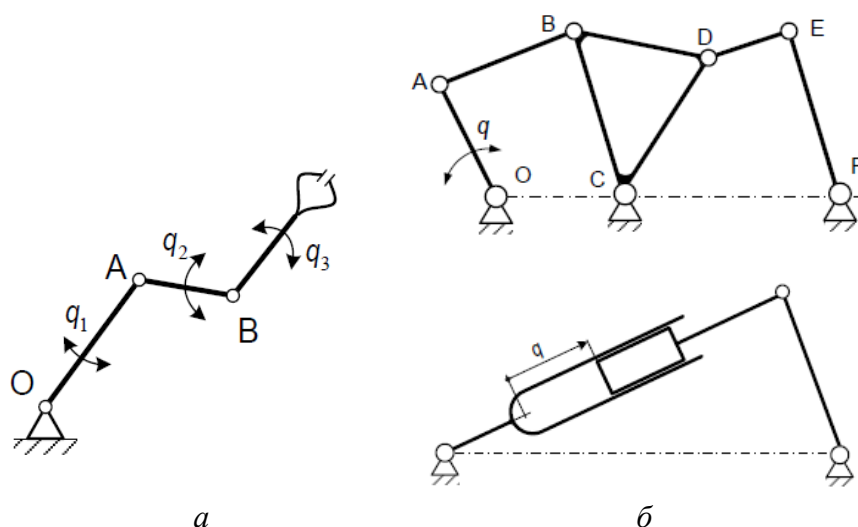


Рисунок 5 – Типы механических конструкций

Механизмы с открытой кинематической цепью (тип 1) имеют, как правило, более одной степени подвижности и соответствующее количество приводов. Такие механизмы называются манипулятивными, они могут применяться на агропромышленных гусеничных погрузчиках. Такую конструкцию имеют все промышленные роботы.

Механизмы с замкнутой кинематической цепью (тип 2) имеют, как правило, одну степень подвижности и сложную кинематику и могут применяться, например, в роторных машинах и экскаваторах для рытья мелиоративных траншей и котлованов.

Прежде чем решать прямые и обратные задачи для определенных механических конструкций, важно понимать, что для многих механизмов типа 1 или типа 2 практически невозможно решить обратную задачу кинематики, не решив предварительно прямую.

Получение таблицы параметров манипуляционной системы

Для описания кинематических структур первого типа используются различные методы: метод векторного кинематического анализа, метод винта, метод Хаяти – Робертса и другие виды геометрического моделирования. Среди них наиболее широко используется матричный метод (метод Денавита – Хартенберга).

Специальный выбор систем координат системы манипуляции в этом методе позволяет использовать только четыре параметра (а не шесть, как в общем случае) для описания перехода от одной системы к другой. Исходную систему $(\lambda - 1)$ можно преобразовать в систему λ с помощью поворота, двух сдвигов и еще одного поворота, выполняемых в следующем порядке:

- 1) вращение системы $(\lambda - 1)$ вокруг оси $z_{\lambda-1}$ на угол θ_λ до тех пор, пока ось $x_{\lambda-1}$ не станет параллельна оси x_λ ;
- 2) смещение повернутой системы вдоль оси $z_{\lambda-1}$ на величину S_λ до тех пор, пока оси $x_{\lambda-1}$ и x_λ не окажутся на одной прямой;
- 3) сдвиг по оси x_λ на величину α_λ до совпадения начала координат;
- 4) поворот вокруг оси x_λ на угол α_λ до совпадения оси $z_{\lambda-1}$ с осью z_λ .

Каждое из этих элементарных движений соответствует одной из B -матриц: матрице вращения или матрице смещения (сдвига). Результирующая матрица перехода A_i , соединяющая системы $(\lambda - 1)$ и λ , является произведением этих матриц:

$$A_\lambda = B_{rot}(\overset{\mathbf{i}}{k}, \theta_\lambda) \cdot B_{sh}(\overset{\mathbf{i}}{k}, q_z) \cdot B_{sh}(\overset{\mathbf{i}}{i}, q_x) \cdot B_{rot}(\overset{\mathbf{i}}{i}, \theta_\lambda). \quad (11)$$

Запишем матрицы смещения (сдвига) и поворота. Пусть система λ получается из системы $(\lambda - 1)$ поступательным перемещением (сдвигом) последней вдоль оси x на расстояние S . Тогда

$$B_{sh}(\overset{\mathbf{r}}{i}, S) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & S \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Две другие матрицы смещения по осям y и z :

$$B_{sh}(\overset{\mathbf{r}}{j}, S) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & S \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad B_{sh}(\overset{\mathbf{r}}{k}, S) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & S \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Если система λ может быть получена из системы $(\lambda - 1)$ поворотом последней вокруг одной из ее координатных осей на угол φ , то матрица B будет называться матрицей вращения:

$$\begin{aligned}
 B_{rot}^{\mathbf{r}}(i, \varphi) &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \\
 B_{rot}^{\mathbf{r}}(j, \varphi) &= \begin{vmatrix} \cos \varphi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \\
 B_{rot}^{\mathbf{r}}(k, \varphi) &= \begin{vmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.
 \end{aligned} \tag{14}$$

В выражениях (14) угол φ положительный, если поворот системы $(\lambda - 1)$ вокруг соответствующей оси перед выравнением с системой λ считался против часовой стрелки.

Принимая во внимание выражения (11)–(14), получаем общий вид матрицы перехода:

$$A_{\lambda} = \begin{vmatrix} \cos \theta_{\lambda} & -\sin \theta_{\lambda} \cos \alpha_{\lambda} & \sin \theta_{\lambda} \sin \alpha_{\lambda} & a_{\lambda} \cos \theta_{\lambda} \\ \sin \theta_{\lambda} & \cos \theta_{\lambda} \cos \alpha_{\lambda} & -\cos \theta_{\lambda} \sin \alpha_{\lambda} & a_{\lambda} \sin \theta_{\lambda} \\ 0 & \sin \alpha_{\lambda} & \cos \alpha_{\lambda} & S_{\lambda} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \tag{15}$$

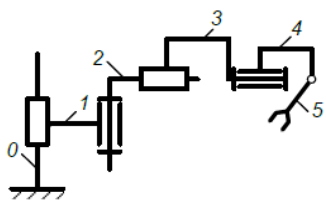
Матрица A_{λ} включает четыре параметра: θ_{λ} , S_{λ} , a_{λ} , α_{λ} . Для любой кинематической пары три из них должны быть постоянными и только одна – переменной. Для вращательной пары угол θ_{λ} является переменным, а для поступательной пары смещение равно S_{λ} . Таким образом, каждая матрица A_{λ} содержит только одну переменную, которую мы будем называть обобщенной координатой и обозначать q_{λ} .

Проблема прямой кинематики решается умножением матриц перехода:

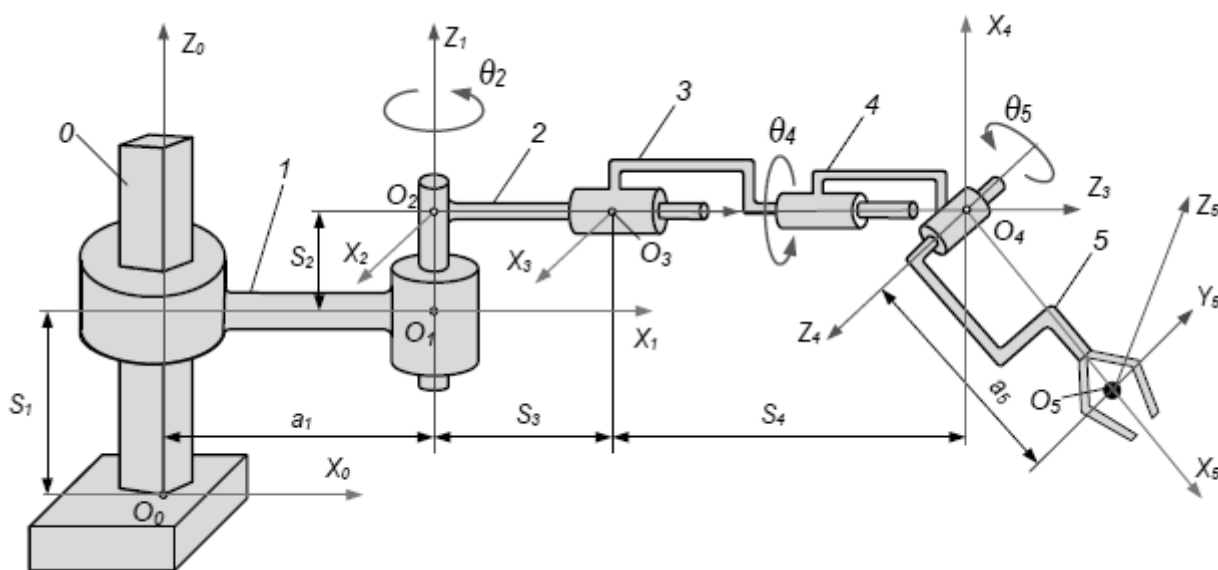
$$T_n = \prod_{\lambda=1}^n A_{\lambda}. \tag{16}$$

Получение матрицы переходов для структуры манипуляции объекта управления

Задача состоит в том, чтобы получить матрицу перехода для структуры манипуляции, показанной на рисунке 6.



a



б

Рисунок 6 – Структура манипуляции

Система манипуляции имеет пять степеней подвижности, которые соответствуют пяти обобщенным координатам: $S_1, \theta_2, S_3, a_5, \theta_4, \theta_5$.

Типы кинематических пар и значения параметров приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Типы кинематических пар и значения параметров

Кинематическая пара	Тип пары	Номер ссылки	Параметры			
			θ	α	S	a
0-1	Поступательная	1	0	0	S_1	a_1
1-2	Вращательная	2	θ_2	$-\pi/2$	S_2	0
2-3	Поступательная	3	0	0	S_3	0
3-4	Вращательная	4	θ_4	$-\pi/2$	S_4	0
4-5	Вращательная	5	θ_5	$-\pi/2$	0	a_5

Тогда в соответствии с таблицей 4 и формулой (15) получим матрицы перехода:

$$A_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & S_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad A_2 = \begin{vmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad A_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & S_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$A_4 = \begin{vmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & S_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad A_5 = \begin{vmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & a_5 \cos \theta_5 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & a_5 \sin \theta_5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Пример. Задача состоит в решении прямой кинематической задачи положения грузозахватного устройства роботизированного трубоукладчика, оснащенного системой управления положением груза (трубы) и системой управления курсом (рисунок 7).

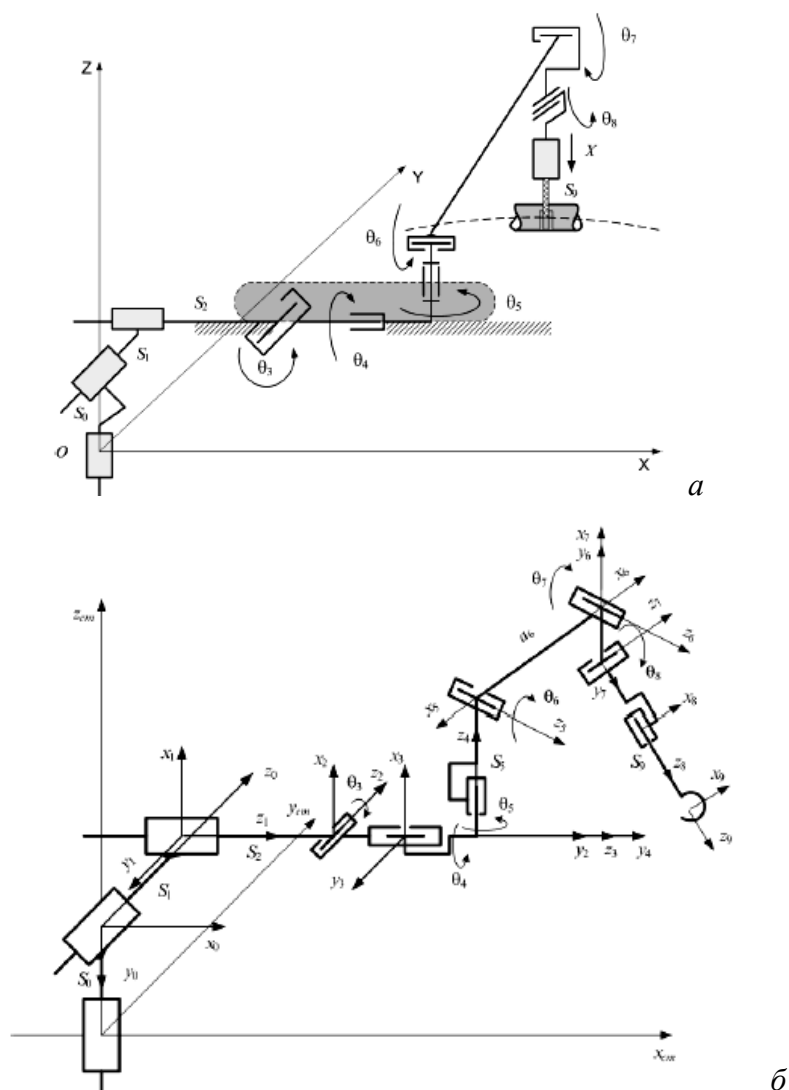


Рисунок 7 – Задача положения грузозахватного устройства роботизированного трубоукладчика

При изучении работы робота-трубоукладчика необходимо определить пространственное положение машины и точку подвеса трубы относительно некоторой базовой системы координат $x_{cm}y_{cm}z_{cm}$, связанной, например, с наземным основанием. В этом случае кинематическая модель крана-трубоукладчика, оснащенного системами погрузки и управления курсом, может быть представлена как система с десятью степенями подвижности (см. рисунок 7), из которых первые шесть степеней подвижности связаны с положением центра тяжести крана в пространстве. Здесь 1-я, 2-я и 3-я кинематические пары поступательного движения (параметры S_0, S_1, S_3) определяют центр тяжести крана при горизонтальном положении машины, 4-я и 5-я пары вращения (углы θ_3, θ_4) определяют соответственно продольный и поперечный крен машины, а 6-я пара вращения (угол θ_5) – возможность поворота крана вокруг вертикальной оси (курсовой угол). Следующие кинематические пары осуществляют переход от центра тяжести машины к оси якоря стрелы (параметр S_5), определяют угол наклона стрелы (угол θ_6) и положение точки подвеса грузового троса на конце стрелы (параметр a_6), позволяют определить вращательное смещение подвески по продольной оси станка (угол θ_7), отклонение грузового троса от вертикали в поперечной плоскости станка (угол θ_8), а также прямой подъем или опускание грузового троса (параметр S_9).

Все параметры занесены в таблицу 5.

Таблица 5 – Значения параметров для примера

Номер кинематической пары	Параметры			
	θ_i	α_i	S_i	a_i
0	0	$-\pi/2$	S_0	0
1	0	$-\pi/2$	S_1	0
2	0	$\pi/2$	S_2	0
3	θ_3	$-\pi/2$	S_3	0
4	θ_4	$\pi/2$	0	0
5	θ_5	$-\pi/2$	S_5	0
6	θ_6	0	0	a_6
7	θ_7	$\pi/2$	0	0
8	θ_8	$-\pi/2$	0	0
9	0	0	S_9	0

Тогда, используя таблицу параметров (таблица 5), получим следующую систему переходных матриц для описания пространственного положения крюка крана-трубоукладчика:

$$\begin{aligned}
A_0 &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & S_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, & A_1 &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & S_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, & A_2 &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \\
A_3 &= \begin{vmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, & A_4 &= \begin{vmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \\
A_5 &= \begin{vmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, & A_6 &= \begin{vmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & a_6 \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & a_6 \sin \theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \\
A_7 &= \begin{vmatrix} \cos \theta_7 & 0 & \sin \theta_7 & 0 \\ \sin \theta_7 & 0 & -\cos \theta_7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, & A_8 &= \begin{vmatrix} \cos \theta_8 & 0 & -\sin \theta_8 & 0 \\ \sin \theta_8 & 0 & \cos \theta_8 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, & A_9 &= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & S_9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.
\end{aligned}$$

Общая матрица преобразования (решение прямой кинематической задачи) представлена в виде

$$A_{09} = \prod_{i=1}^9 A_i.$$

Прямая задача кинематики объекта управления

Рассмотрим решение прямой и обратной кинематических задач кривошипно-скользящего механизма (рисунок 8).

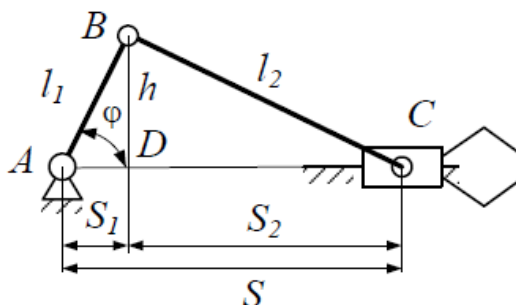


Рисунок 8 – Кривошипно-скользящий механизм

Здесь функция $S = f(\varphi)$ – решение прямой задачи кинематики, а функция $\varphi = f(S)$ – решение обратной задачи кинематики.

Решение

Способ 1. Представить треугольник ABC , в котором известны стороны l_1 и l_2 , как сумму двух треугольников – ABD и DBC . Из треугольника ABD определить значения S_1 и h :

$$S_1 = l_1 \cos \varphi, \quad h = l_1 \sin \varphi.$$

Расстояние S_2 определить из теоремы Пифагора:

$$S_2 = \sqrt{l_2^2 - h^2} = \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \varphi}.$$

Общее движение ползунка

$$S = S_1 + S_2 = l_1 \cos \varphi + \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \varphi}.$$

Также можно получить зависимости из последнего выражения $\varphi = f(S)$. Таким образом, решая задачу разделением треугольника ABC на треугольники ABD и DBC , можно решить прямую кинематическую задачу $S = f(\varphi)$.

Способ 2. Рассматривая треугольник ABC со сторонами l_1 , l_2 , S , определить значение S при помощи теоремы косинусов.

На основании этой теоремы

$$l_2^2 = l_1^2 + S^2 - 2l_1S \cos \varphi,$$

откуда решение обратной кинематической задачи $\varphi = f(S)$

$$\varphi = \arccos \left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + S^2}{2l_1S} \right).$$

Для более сложных кинематических структур рычажных механизмов может применяться метод проецирования замкнутых векторных контуров. В соответствии с этим методом в кинематическую схему механизма вносятся векторы, связанные со звеньями механизма. Затем выделяется серия замкнутых векторных контуров и для каждого из них составляется векторное уравнение, отражающее условие

замыкания контура. Число векторных уравнений, равное числу контуров z , зависит от числа звеньев n плоского механизма. Чаще $z = (n - 1) : 2$. Затем векторные уравнения проецируются на оси x и y неподвижной системы координат Oxy . Результатом является система из $2z = n - 1$ скалярных уравнений. Это исходная система уравнений анализа. Неизвестные переменные – это параметры механизма, количество которых обычно равно количеству уравнений, т. е. $(n - 1)$. В этом случае обобщенная координата механизма считается известной.

Это можно проиллюстрировать на примере шестизвенного навесного механизма второго сорта (рисунок 9). Постоянные параметры этого механизма включают $l_0, l_1, l_2, \theta_2, b_2, l_3, l_4, l_5, \theta_5, b_5$, переменные параметры – $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$. Угол φ_1 – обобщенная координата механизма.

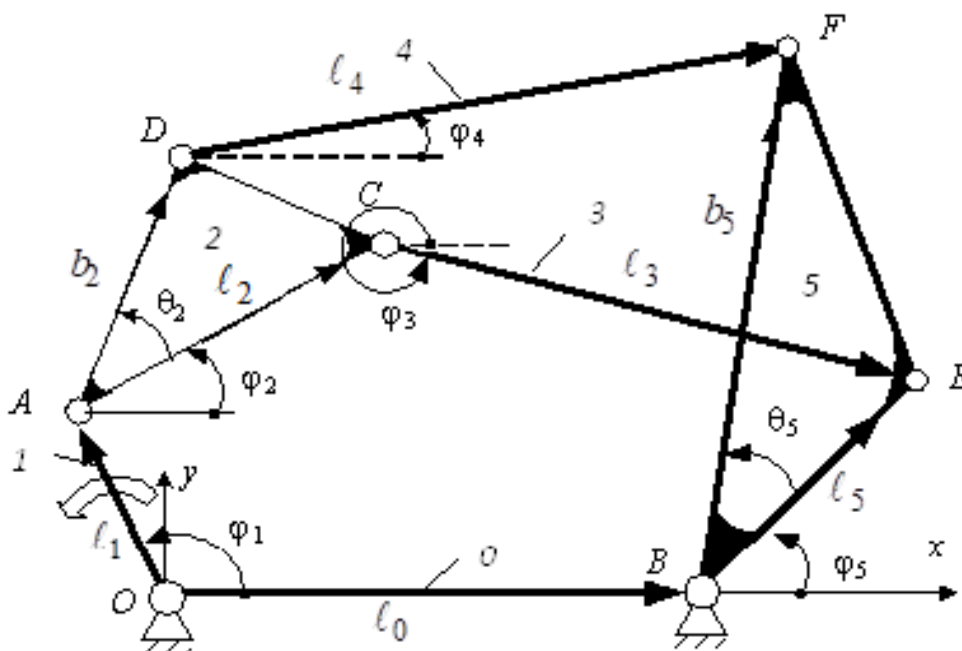


Рисунок 9 – Шестизвенный навесной механизм

Сначала на кинематической схеме механизма вводят векторы \overrightarrow{OA} , \overrightarrow{AC} , \overrightarrow{CE} , \overrightarrow{AD} , \overrightarrow{DF} , \overrightarrow{OB} , \overrightarrow{BE} , \overrightarrow{BF} . Затем выбирают два замкнутых векторных контура $OASEVO$ и $OADFBO$ и составляют для них два векторных уравнения

$$\begin{cases} \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AC} + \overrightarrow{CE} = \overrightarrow{OB} + \overrightarrow{BE}, \\ \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AD} + \overrightarrow{DF} = \overrightarrow{OB} + \overrightarrow{BF}. \end{cases}$$

Проецируя эти векторные уравнения на оси x и y , получают четыре скалярных уравнения

$$\begin{aligned}
l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 + l_3 \cos \varphi_3 &= l_0 + l_5 \cos \varphi_5, \\
l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 + l_3 \sin \varphi_3 &= l_5 \sin \varphi_5, \\
l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos(\varphi_2 + \theta_2) + l_4 \cos \varphi_4 &= l_0 + l_5 \cos(\varphi_5 + \theta_5), \\
l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin(\varphi_2 + \theta_2) + l_4 \sin \varphi_4 &= l_5 \sin(\varphi_5 + \theta_5)
\end{aligned}$$

с четырьмя неизвестными значениями φ_2 , φ_3 , φ_4 и φ_5 .

Если количество уравнений равно количеству неизвестных, то эта система легко решается относительно неизвестных φ_2 , φ_3 , φ_4 и φ_5 с использованием различных численных методов.

Компоненты ошибки позиционирования механизма манипуляции

Расчет и анализ ошибок в мехатронных и роботизированных модулях движения занимает особое место при проектировании мехатронных систем.

Анализ кинематических погрешностей проводится на основе решения прямой задачи кинематики.

В общем случае ошибка позиционирования пространственного мехатронного модуля определяется как

$$\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2},$$

где Δx , Δy , Δz – ошибки в декартовых координатах рабочего тела/исполнительного механизма, определяемые разложением в ряд Тейлора для каждой координаты функции прямой кинематической задачи:

$$\Delta x_n = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial x_i}{\partial q_i} \right| \Delta q_i, \quad \Delta y_n = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial y_i}{\partial q_i} \right| \Delta q_i, \quad \Delta z_n = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial z_i}{\partial q_i} \right| \Delta q_i, \quad (17)$$

где x_i , y_i , z_i – координаты точки позиционирования i -й степени подвижности;
 n – количество степеней подвижности механизма.

В выражениях (17) погрешности обобщенных координат Δq_i представляют собой погрешности систем сервоуправления, к которым в основном относятся погрешности сервоконтроллеров Δq_i^{reg} , измерительных устройств (датчиков) Δq_i^{act} и механических соединений (коробки передач) Δq_i^{red} .

Тогда

$$\Delta q_i = \sqrt{(\Delta q_i^{reg})^2 + (\Delta q_i^{act})^2 + (\Delta q_i^{red})^2}.$$

Исследование зависимостей $\left| \frac{\partial x_i}{\partial q_i} \right| = f(q_i)$, $\left| \frac{\partial y_i}{\partial q_i} \right| = f(q_i)$, $\left| \frac{\partial z_i}{\partial q_i} \right| = f(q_i)$ и определение величин $\left| \frac{\partial x_i}{\partial q_i} \right|_{\max}$, $\left| \frac{\partial y_i}{\partial q_i} \right|_{\max}$, $\left| \frac{\partial z_i}{\partial q_i} \right|_{\max}$ позволяет грамотно подойти к выбору принципов построения систем управления сервоприводами, типов регуляторов, измерительных приборов (датчиков).

Рассмотрим пример определения кинематической погрешности позиционирования для механизма, изображенного на рисунке 9. Для этого механизма решение прямой кинематической задачи получено в виде $S = l_1 \cos \varphi + \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \varphi}$.

Следует разложить эту функцию в ряд Тейлора в соответствии с выражениями (17):

$$\Delta S = \left| \frac{dS}{d\varphi} \right| \cdot \Delta\varphi = \left| -l_1 \sin \varphi - 0,5 \cdot \frac{2l_1^2 \sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \varphi}} \right| \cdot \Delta\varphi = \left(l_1 \sin \varphi + 0,5 \cdot \frac{l_1^2 \sin 2\varphi}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \varphi}} \right) \cdot \Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi$ – погрешность автоматического регулирования угла поворота кривошипа.

Из последнего выражения видно, что при разных положениях кривошипа (под разными углами φ) погрешность позиционирования будет разной. Поэтому для кинематических конструкций с рычажными механизмами следует проводить детальный анализ влияния различных геометрических параметров и размеров звеньев на погрешность позиционирования.

Пример выполнения курсовой работы по решению задачи управления механизмами манипуляции приведен в приложении А.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Оформление листов расчетно-пояснительной записки

1. Текстовые материалы РПЗ выполняются на листах белой машинописной бумаги, оформленных рамками в соответствии с рисунком 10.

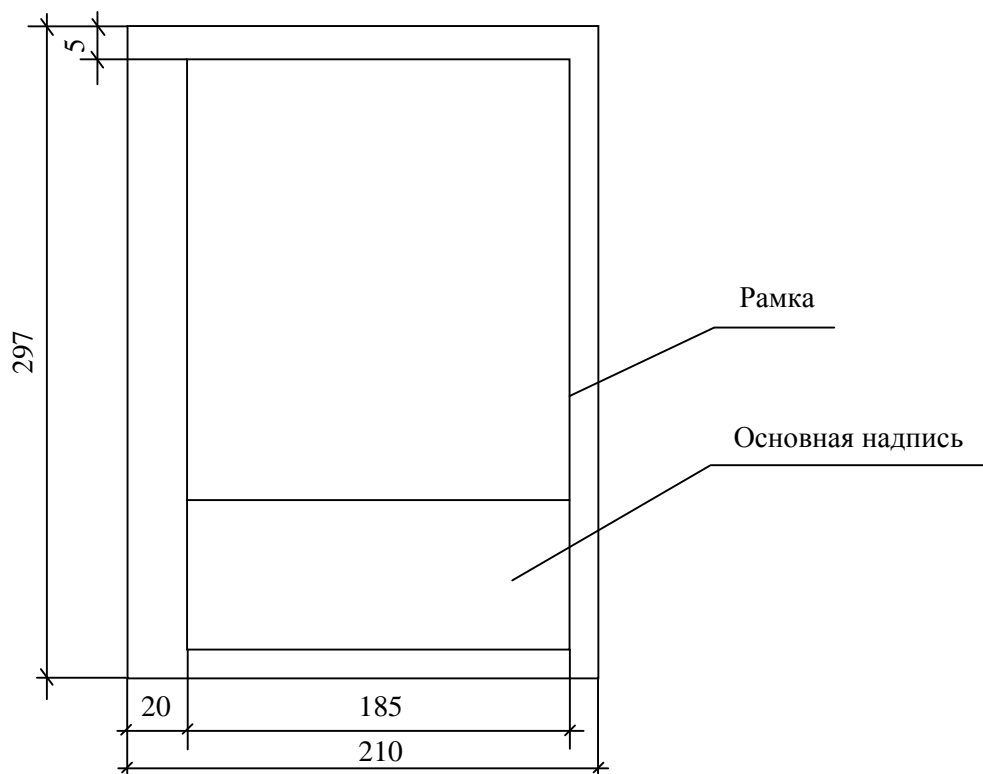


Рисунок 10 – Компоновка и размеры листа текстовой части РПЗ

2. Основная надпись на листах пояснительной записки выполняется в соответствии с рисунком 11.

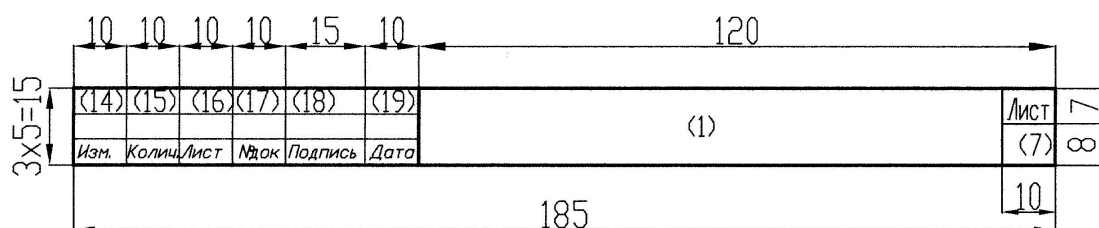


Рисунок 11 – Форма основной надписи для листов РПЗ

3. Листы записки и приложений имеют сквозную нумерацию арабскими цифрами. Титульному листу, заданию на курсовую работу, реферату номера присваивают, но не проставляют. Номера страниц начинают проставлять с листа «Содержание».

4. Иллюстрации (таблицы, чертежи, схемы и т. п.), расположенные на отдельных листах записки, включают в общую нумерацию страниц. При этом лист, формат которого больше формата А4, учитывают как одну страницу.

Правила построения текстового материала:

1. Текстовый материал РПЗ подразделяют на разделы, подразделы, пункты.

Разделам присваивают порядковые номера, которые обозначают арабскими цифрами без точки и записывают с абзацного отступа.

Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номера раздела и номера подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится.

Если раздел или подраздел состоит из одного пункта, то пункт не нумеруется.

2. Разделы и подразделы и при необходимости пункты должны иметь заголовки. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов, пунктов. Переносы слов в заголовках не допускаются.

Заголовки подразделов (пунктов) не должны повторять содержание заголовков разделов (подразделов).

Заголовок записывается с прописной буквы. Точка в конце не ставится. Заголовки не подчеркиваются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

3. Каждый раздел РПЗ следует начинать с новой страницы.

Формулы:

1. В пояснительной записке математические формулы могут быть расположены внутри текста или отдельными строками. Внутри текста помещают несложные и недробные формулы. Такие формулы, как правило, не нумеруют.

На отдельных строках приводят более сложные формулы, которые обычно сопровождаются пояснениями примененных символов. При этом выше и ниже формулы необходимо оставлять по одной свободной от записи строке.

2. Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, разделяют запятой.

3. Если формула не уместится в одну строку, то делается перенос. Переносить формулу на следующую строку допускается только на знаках выполнения операций: плюс (+), минус (−), умножение (×) или на знаках равенства (=), неравенства (\neq), знаках соотношений и т. п.

4. Все формулы, помещенные в тексте РПЗ, при необходимости нумеруют арабскими цифрами, которые записывают на уровне формулы справа от нее в круглых скобках.

5. Допускается нумерация формул в пределах раздела. В этом случае номер формулы состоит из номера раздела и номера формулы, разделенных точкой, например: (3.1).

Пример. Номинальный ток асинхронного электродвигателя I_n , А, определяется по формуле

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \cos \varphi_n \eta_n}, \quad (66)$$

где P_n – номинальная мощность, кВт;
 U_n – номинальное напряжение, кВ;
 $\cos \varphi_n$ – коэффициент мощности, о. е.;
 η_n – КПД электродвигателя, о. е.

Таблицы:

1. Название таблицы должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Название следует размещать над таблицей после слова «Таблица».

При переносе части таблицы на другие страницы название помещают только над первой частью таблицы.

2. Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

3. На все таблицы должны быть приведены ссылки в тексте. При ссылке необходимо писать слово «таблица» с указанием ее номера.

4. Заголовки граф и строк в таблице следует писать с прописной буквы, а подзаголовки граф – со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставят.

Оформление проектной документации

Проектной документации присваивают обозначение, состоящее из базового цифрового обозначения и через тире – буквенного обозначения (см. структуру обозначения).

Структура базового обозначения при курсовом проектировании:

$$X_1X_2.X_3X_4.X_5X_6X_7.X_8X_9 - X_{10}X_{11}X_{12},$$

где X_1X_2 – индекс работы: 02 – курсовой проект, 03 – курсовая работа;
 X_3X_4 – индекс кафедры;

Указания о заполнении основной надписи

В графах основной надписи (на рисунках 11, 12, 13 номера граф показаны в скобках) указываются:

- а) в графе 1 – обозначение проектной документации – маркировка документа:
 - базовое обозначение;
 - добавляемая через дефис марка разрабатываемых чертежей;
- б) в графе 2 – тема курсовой работы;
- в) в графе 3 – наименование здания (сооружения). Для чертежа генерального плана в графе 3 записывают наименование соответствующего раздела, например «электроснабжение», «теплоснабжение» или «диспетчеризация», «диспетчерское управление»;
- г) в графе 4 – наименование изображения или материала, помещенного на данном листе, т. е. название чертежа, листа. Если на листе приведены несколько материалов (например, план здания, разрез II–II, экспликация, перечень элементов, сечение «А–А» и т. п.), то в название чертежа включают основные материалы, второстепенные – опускают;
- д) в графе 5 – наименование документа аналогично графе 4 (обычно – «Расчетно-пояснительная записка»);
- е) в графе 6 – условное обозначение стадии проектирования: «С» (строительный проект);
- ж) в графе 7 – порядковый номер листа. На документе, состоящем из одного листа, графу не заполняют;
- з) в графе 8 – общее число листов документа;
- и) в графе 9 на первой строке – наименование организации, разработавшей документ (БГАТУ), на второй строке – шифр зачетной книжки студента;
- к) в графе 10 – характер работы: «разработал» (студент), в следующей строке – «руководитель», далее – «консультант», «нормоконтролер», «зав. кафедрой»;
- л) в графе 11 – фамилии студента, руководителя, консультанта(ов), нормоконтролера, заведующего кафедрой в соответствующих строках;
- м) в графе 12 – подписи;
- н) в графе 13 – даты.

Графы 14–19 в дипломных и курсовых проектах (работах) не заполняются.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анхимюк, В. Л. Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Олейко, Н. Н. Михеев. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.
2. Баландин, Д. В. Классические и современные методы построения регуляторов в примерах : [электронное учебно-методическое пособие] / Д. В. Баландин, С. Ю. Городецкий. – Н. Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. – 122 с. – 1 CD-ROM. – Текст : электронный.
3. Власов, К. П. Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета : учебное пособие / К. П. Власов. – [2-е изд., испр. и доп.]. – Харьков : Гуманитарный центр, 2013. – 540 с.
4. Власов, К. П. Теория автоматического управления : учебное пособие / К. П. Власов. – Харьков : Гуманитарный центр, 2007. – 528 с. : ил.
5. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB : учебное пособие / А. Р. Гайдук, В. Е. Беляев, Т. А. Пьявченко. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2011. – 464 с.
6. Горский, В. Г. Последовательный симплекс-метод / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер // Планирование промышленных экспериментов // М. : Metallurgia, 1974. – Гл. 5. – 176–257 с.
7. Дилигенская, А. Н. Идентификация объектов управления : учебное пособие / А. Н. Дилигенская. – Самара : СамГТУ, 2009. – 136 с.
8. Дьяконов, В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем / В. Дьяконов, В. Круглов // СПб. : Питер, 2001. – 448 с.
9. Ерофеев, А. А. Теория автоматического управления : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. / А. А. Ерофеев. – СПб. : Политехника, 2003. – 302 с. : ил.
10. Коновалов, Б. М. Теория автоматического управления : учебное пособие / Б. М. Коновалов, Ю. М. Лебедев. – 3-е изд., доп. и перераб. – СПб. : Лань, 2015. – 220 с.
11. Кочетков, В. П. Основы теории управления : учебное пособие / В. П. Кочетков. – Ростов н/Д : Феникс, 2012. – 412 с.
12. Ощепков, А. Ю. Системы автоматического управления: теория, управление, моделирование в MATLAB : учебное пособие / А. Ю. Ощепков. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2013. – 208 с.: ил.
13. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления : учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Я. Ротач. – М. : МЭИ, 2004. – 400 с.
14. Сидоренко, Ю. А. Теория автоматического управления / Ю. А. Сидоренко. – Минск, БГАТУ, 2007. – 124 с.

15. Тарасов, А. В. Экспериментальное определение передаточной функции объекта регулирования / А. В. Тарасов, А. А. Чепуштанов, Н. С. Горяев // Ползуновский альманах. – 2011. – № 1. – С. 116–118.

16. Теория автоматического управления : учебник / В. Н. Брюханов, М. Г. Косов, С. П. Протопопов [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – 4-е изд., стер. – М. : Высшая школа, 2003. – 272 с. : ил.

17. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб. : Невский диалект, 2001. – 557 с.

18. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

19. Шидловский, С. В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры / С. В. Шидловский. – Томск : ТГУ, 2006. – 288 с.

Технические нормативные правовые акты

20. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения : ГОСТ 19.701–90. – Взамен ГОСТ 19.002–80, ГОСТ 19.003–80 ; введ. 01.01.1992. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 24 с.

21. Якубовская, Е. С. Системы автоматизации сельскохозяйственного производства. Курсовое и дипломное проектирование : учебное пособие / Е. С. Якубовская, В. А. Павловский. – Минск : БГАТУ, 2022. – 280 с.

Интернет-ресурсы

22. Датчики температуры : [сайт]. – URL: <http://www.altermo.ru/katalog/datchiki-temperature-danfoss> (дата обращения: 08.09.2025).

23. Официальный сайт компании MathWorks : [сайт]. – URL: <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (дата обращения: 08.09.2025).

24. Центр компетенций MATLAB и Simulink : [сайт]. – URL: <http://matlab.ru/> (дата обращения: 08.09.2025).

Пример выполнения расчетно-пояснительной записки к курсовой работе

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Агроэнергетический факультет

Кафедра автоматизированных систем
управления производством

Курсовая работа

по дисциплине «Теория автоматического управления»

Вариант № 17

Тема: «Решение задачи управления механизмами манипуляции
при последовательном переносе детали»

Студент 2 курса 23а группы

_____/Иванов И. И./
(личная подпись) (Ф. И. О.)

Шифр зачетной книжки

Руководитель

_____/Матвейчук Н. Н./
(личная подпись) (Ф. И. О.)

Минск, 2025

Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет»
Агроэнергетический факультет

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой АСУП

_____ / _____ /

«16» сентября 2025 г.

ЗАДАНИЕ
на курсовую работу

1. Тема курсовой работы:

«Решение задачи управления механизмами манипуляции при последовательном переносе детали».

2. Краткое описание объекта управления.

Объектом управления САР является лабораторная установка «Станция манипулятора», установленная в ауд. 307₁.

Установка включает в себя магнитный бесконтактный датчик, цилиндр двухстороннего действия (2 шт.) с направляющими для перемещения по осям x и y , захват для захвата детали, платформу для складирования, распределительную коробку с многоштырьковой вилкой, дроссели с обратными клапанами, распределители с электромагнитами, 3/2-распределитель с ручным управлением (перекрывает источник сжатого воздуха), компрессор. Устройство управления – контроллер.

Алгоритм функционирования: последовательный перенос детали.

Требуется получить математическое описание объекта управления (механизма манипуляции) как кинематической структуры.

3. Перечень подлежащих разработке вопросов:

1. Получить кинематическую модель объекта управления.
2. Выбрать систему координат объекта управления и получить таблицу параметров манипуляционной системы.
3. Получить матрицы переходов для структуры манипуляции объекта управления.
4. Сформулировать прямую задачу кинематики объекта управления.
5. Решить прямую задачу кинематики объекта управления.

6. Сформулировать обратную задачу кинематики объекта управления.
7. Решить обратную задачу кинематики объекта управления.
8. Определить компоненты ошибки позиционирования механизма манипуляции.

4. Перечень графического материала:

1. Конструктивная схема механизма манипуляции.
2. Матрицы переходов для структуры манипуляции объекта управления.
3. Графические результаты исследования.

5. Дата выдачи задания: «16» сентября 2025 г.

6. Календарный график работы:

- 25 % проекта (вопросы 1, 2) – «15» октября 2025 г.
- 50 % проекта (вопросы 3, 4) – «6» ноября 2025 г.
- 75 % проекта (вопросы 5, 6) – «1» декабря 2025 г.
- 100 % проекта (вопрос 7, оформление записки) «16» декабря 2025 г.

Защита курсовой работы – «23» декабря 2025 г.

Руководитель _____ Матвейчук Н. М.

Задание принял «__» _____ 2025 г. _____
(подпись, Ф. И. О.)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1 Исходные данные.....	7
2 Разработка кинематической модели объекта управления.....	8
3 Получение таблицы параметров манипуляционной системы.....	9
4 Получение матрицы переходов для структуры манипуляции объекта управления.....	10
5 Прямая задача кинематики объекта управления.....	14
6 Обратная задача кинематики объекта управления.....	15
7 Компоненты ошибки позиционирования механизма манипуляции.....	16
8 Создание компьютерной динамической модели САР в Simulink.....	17
Заключение.....	18
Список использованных источников.....	19
Приложение А.....	20

						03.49.011.25 – РПЗ		
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата			
Разраб.	Иванов					Стадия	Лист	Листов
Руковод.	Матвейчук					УП	5	19
Консульт.						БГАТУ Шифр		
Зав. каф.								
Расчетно-пояснительная записка								

2 РАЗРАБОТКА КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Управляемая величина – положение рабочей точки $M(x, z)$ (захвата манипулятора). Изначальное положение рабочей точки в пространстве относительно точки опоры (подставки) составляет $x_0 = 145$ мм, $z_0 = 125$ мм (все пневмоцилиндры задвинуты). Однако для расчетов принимаем положение рабочей точки M равным $x_0 = 0$ мм, $z_0 = 0$ мм, т. е. началу координат. Для определения положения рабочей точки используются магнитные датчики Холла, расположенные по краям пневмоцилиндров, которые преобразуют информацию о положении пневмоцилиндра в электрический сигнал напряжения U_d , В. Перемещение захвата осуществляется посредством выдвигания/возврата пневмоцилиндра. Управляющее воздействие на объект – изменение положения пневмораспределителя путем подачи электрического сигнала на катушки электромагнитов привода распределителя.

Кинематическая модель представлена на рисунке 1.

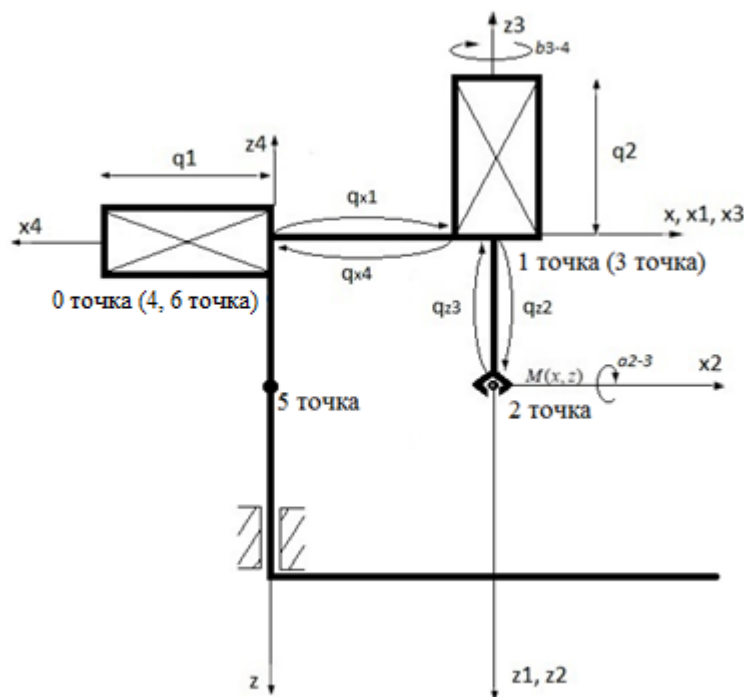


Рисунок 1 – Кинематическая модель рассматриваемого механизма манипуляции

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

Система 3 получается из системы 2 поступательным перемещением (сдвигом) последней вдоль оси z на расстояние q_{z3} и поворотом вокруг оси x на 180° . Следовательно, матрица 3 имеет вид:

$$A_3 = B_{\text{пов}}(\mathbf{i}, 0) \cdot B_{\text{сдв}}(\mathbf{k}, q_{z3}) \cdot B_{\text{сдв}}(\mathbf{i}, 0) \cdot B_{\text{пов}}(\mathbf{i}, \pi).$$

Система 4 получается из системы 3 поступательным перемещением (сдвигом) последней вдоль оси x на расстояние q_{x4} и поворотом вокруг оси z на 180° . Следовательно, матрица 4 имеет вид:

$$A_4 = B_{\text{пов}}(\mathbf{k}, \pi) \cdot B_{\text{сдв}}(\mathbf{k}, 0) \cdot B_{\text{сдв}}(\mathbf{i}, q_{x4}) \cdot B_{\text{пов}}(\mathbf{i}, 0).$$

Система 5 получается из системы 4 поступательным перемещением (сдвигом) последней вдоль оси z на расстояние q_{z5} и поворотом вокруг оси x на 180° . Следовательно, матрица 5 имеет вид:

$$A_5 = B_{\text{пов}}(\mathbf{k}, 0) \cdot B_{\text{сдв}}(\mathbf{k}, q_{z5}) \cdot B_{\text{сдв}}(\mathbf{i}, 0) \cdot B_{\text{пов}}(\mathbf{i}, \pi).$$

Система 6 получается из системы 5 поступательным перемещением (сдвигом) последней вдоль оси z на расстояние q_{z6} и поворотом вокруг оси x на 180° . Следовательно, матрица 6 имеет вид:

$$A_6 = B_{\text{пов}}(\mathbf{k}, 0) \cdot B_{\text{сдв}}(\mathbf{k}, q_{z6}) \cdot B_{\text{сдв}}(\mathbf{i}, 0) \cdot B_{\text{пов}}(\mathbf{i}, \pi).$$

Матрицы B имеют следующий вид:

$$B_{\text{сдв}}(\mathbf{i}, q_{x1}) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{x1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$B_{\text{сдв}}(\mathbf{k}, q_{z2}) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$B_{\text{сдв}}(\mathbf{k}, q_{z3}) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_{z3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

$$B_{\text{сдв}}^{\mathbf{r}}(i, q_{x4}) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{x4} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$B_{\text{сдв}}^{\mathbf{r}}(k, q_{z5}) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_{z5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$B_{\text{сдв}}^{\mathbf{r}}(k, q_{z6}) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_{z6} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$B_{\text{пов}}^{\mathbf{r}}(i, \pi) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$B_{\text{пов}}^{\mathbf{r}}(k, \pi) = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$B_{\text{пов}}^{\mathbf{r}}(i, \pi) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$B_{\text{пов}}^{\mathbf{r}}(i, \pi) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Подставим полученные матрицы для нахождения результирующей:

$$A_1 = E \cdot E \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{x1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot E = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{x1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$A_2 = E \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot E \cdot E = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$A_3 = E \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_{z3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot E \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & q_{z3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$A_4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & q_{x4} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot E \cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot E = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & q_{x4} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$A_5 = E \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_{z5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot E \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & q_{z5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$A_6 = E \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_{z6} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot E \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & q_{z6} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

5 ПРЯМАЯ ЗАДАЧА КИНЕМАТИКИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Формулировка прямой задачи кинематики объекта управления

В мехатронике и робототехнике часто необходимо решать задачу поиска функциональной связи между координатами позиционирования актуатора x, z (например, захватного устройства робота) и координатами привода q_1, q_2 , которые называются обобщенными координатами.

Непосредственной задачей кинематики является определение функциональной зависимости между координатами положения исполнительного механизма x, z и обобщенными координатами привода q_x, q_z :

$$x = f_1(q_x, q_z),$$

$$z = f_2(q_x, q_z).$$

Учитывая обобщенные координаты привода q_x, q_z , можно найти координаты точки позиционирования робота $M(x, z)$.

Решение прямой задачи кинематики объекта управления

Решение прямой задачи кинематики – это вычисление положения (x, y, z) рабочего органа манипулятора по его кинематической схеме и заданной ориентации.

1-я точка: $x_1 = 0 + q_{x1},$
 $z_1 = 0.$

2-я точка: $x_2 = 0 + q_{x1},$
 $z_2 = 0 + q_{z2}.$

3-я точка: $x_3 = q_{x1},$
 $z_3 = q_{z2} - q_{z3}.$

4-я точка: $x_4 = q_{x1} - q_{x4},$
 $z_4 = q_{z2} - q_{z3}.$

5-я точка: $x_5 = q_{x1} - q_{x4},$
 $z_5 = q_{z2} - q_{z3} + q_{z5}.$

6-я точка: $x_6 = q_{x1} - q_{x4},$
 $z_6 = q_{z2} - q_{z3} + q_{z5} - q_{z6}.$

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

7 КОМПОНЕНТЫ ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМА МАНИПУЛЯЦИИ

Определение компонентов ошибки позиционирования механизма манипуляции

Расчет и анализ ошибок в мехатронных и роботизированных модулях движения занимает особое место при проектировании мехатронных систем.

В общем случае ошибка позиционирования пространственного мехатронного модуля определяется следующим образом:

$$\rho = \sqrt{x^2 + z^2},$$

$$\rho_1 = \sqrt{x^2 + 0},$$

$$\rho_2 = \sqrt{x_1^2 + z_2^2},$$

$$\rho_3 = \sqrt{x_1^2 + (z_2 - z_3)^2},$$

$$\rho_4 = \sqrt{(x_1 - x_4)^2 + (z_2 - z_3)^2},$$

$$\rho_5 = \sqrt{(x_1 - x_4)^2 + (z_2 - z_3 + z_5)^2},$$

$$\rho_6 = \sqrt{(x_1 - x_4)^2 + (z_2 - z_3 + z_5 - z_6)^2}.$$

Изм.	Колич.	Лист	№ док	Подпись	Дата

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной курсовой работе:

- разработана кинематическая модель объекта управления;
- получена таблица параметров манипуляционной системы;
- получены матрицы переходов для структуры манипуляции объекта управления:

$$A_6 = B_{\text{пов}}(\dot{k}, 0) \cdot B_{\text{сдв}}(\dot{k}, q_{z6}) \cdot B_{\text{сдв}}(\dot{i}, 0) \cdot B_{\text{пов}}(\dot{i}, \pi);$$

- сформулирована и решена прямая задача кинематики объекта управления;
- сформулирована и решена обратная задача кинематики объекта управления;
- определены компоненты ошибки позиционирования механизма манипуляции:

$$\rho_6 = \sqrt{(x_1 - x_4)^2 + (z_2 - z_3 + z_5 - z_6)^2};$$

- разработана компьютерная динамическая модель САУ в Simulink;
- проведено моделирование на компьютере.

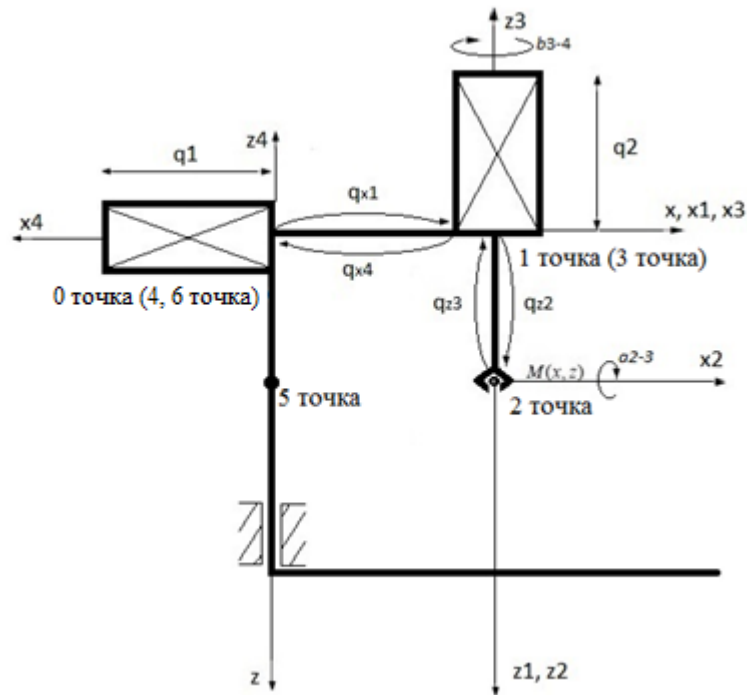
Таким образом, все задачи выполнены, цель курсовой работы достигнута.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

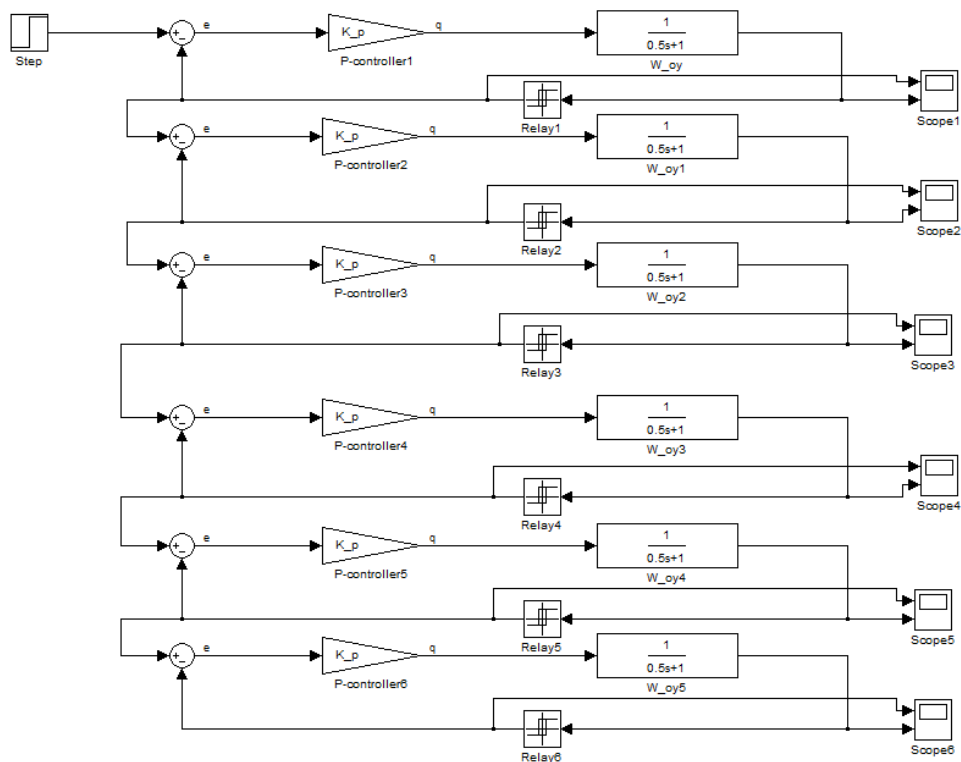
1. Баландин, Д. В. Классические и современные методы построения регуляторов в примерах : [электронное учебно-методическое пособие] / Д. В. Баландин, С. Ю. Городецкий. – Н. Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. – 122 с. – 1 CD-ROM. – Текст : электронный.
2. Горский, В. Г. Последовательный симплекс-метод / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер // Планирование промышленных экспериментов // М. : Металлургия, 1974. – Гл. 5. – 176–257 с.
3. Дилигенская, А. Н. Идентификация объектов управления : учебное пособие / А. Н. Дилигенская. – Самара : СамГТУ, 2009. – 136 с.
4. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
5. Дьяконов, В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем / В. Дьяконов, В. Круглов // СПб. : Питер, 2001. – 448 с.
6. Клавдиев, А. А. Теория автоматического управления в примерах и задачах : учебное пособие : в 2 ч. / А. А. Клавдиев. – СПб. : СЗТУ, 2005. – Ч. 1 : Анализ линейных непрерывных систем автоматики. – 74 с.
7. Клавдиев, А. А. Теория автоматического управления в примерах и задачах : учебное пособие : в 2 ч. / А. А. Клавдиев. – СПб. : СЗТУ, 2005. – Ч. 2. : Моделирование линейных непрерывных систем автоматики. – 75 с.
8. Тарасов, А. В. Экспериментальное определение передаточной функции объекта регулирования / А. В. Тарасов, А. А. Чепуштанов, Н. С. Горяев // Ползуновский альманах. – 2011. – № 1. – С. 116–118.
9. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.
10. Шидловский, С. В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры / С. В. Шидловский. – Томск : ТГУ, 2006. – 288 с.

						<i>03.49.011.25 – РПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Колич.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		19

Пример выполнения графической части курсовой работы



						03.49.011.25 – АТХ		
						Решение задачи управления механизмами манипуляции при последовательном переносе детали		
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата			
Разраб.	Иванов					Стадия	Лист	Листов
Руковод.	Матвейчук					УП	1	3
Консульт.						БГАТУ Шифр		
Н. контр.								
Зав. каф.								
						Механизм манипуляции		
						Кинематическая модель механизма манипуляции		



03.49.011.25 – АТХ

Решение задачи управления механизмами манипуляции
при последовательном переносе детали

Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата

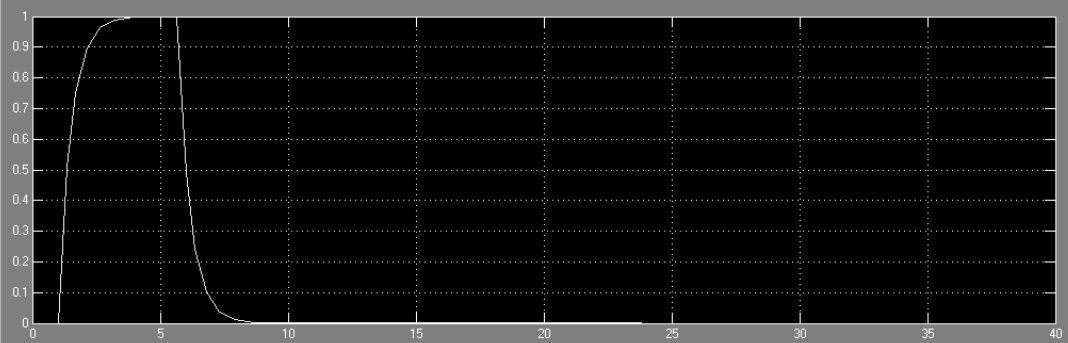
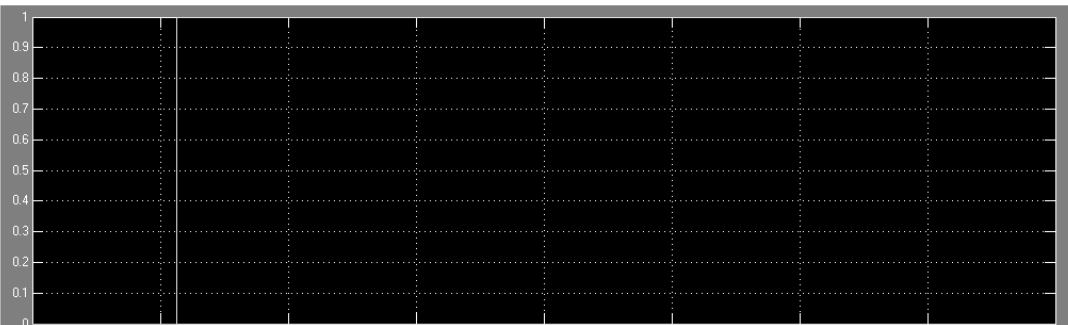
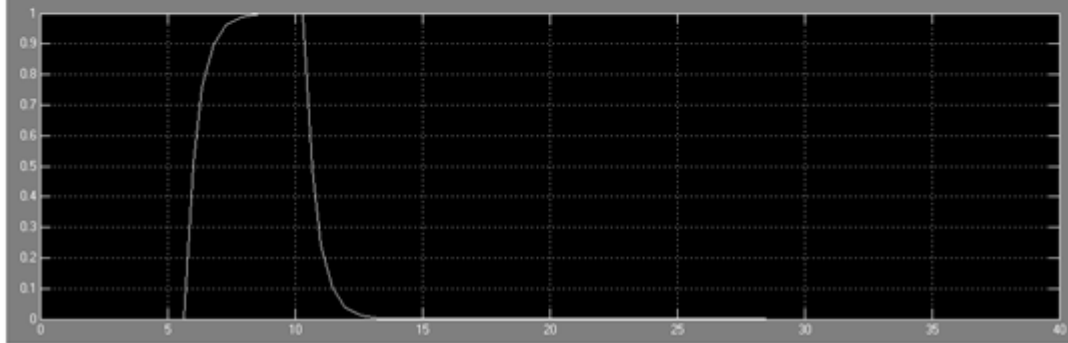
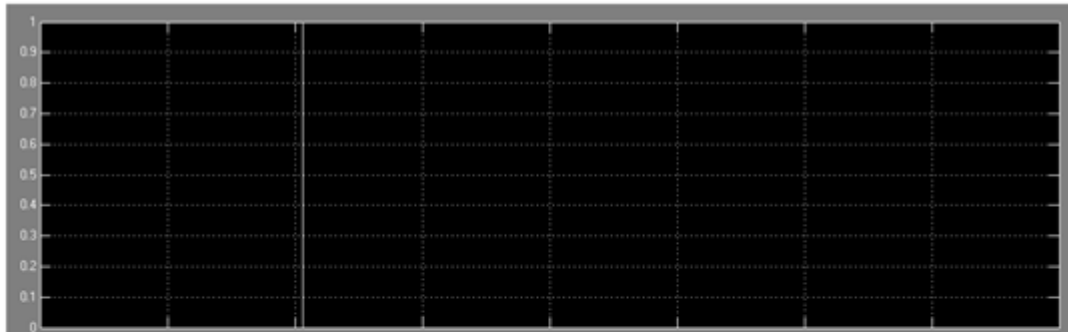
Разраб.	Иванов				
Руковод.	Матвейчук				
Консульт.					
Н. контр.					
Зав. каф.					

Механизм манипуляции

Структурная схема
в пакете MATLAB Simulink

Стадия	Лист	Листов
УП	2	3

БГАТУ
Шифр



						03.49.011.25 – АТХ				
						<i>Решение задачи управления механизмами манипуляции при последовательном переносе детали</i>				
<i>Изм.</i>	<i>Колич.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>					
<i>Разраб.</i>	<i>Иванов</i>					<i>Стадия</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>		
<i>Руковод.</i>	<i>Матвейчук</i>					<i>УП</i>	<i>3</i>	<i>3</i>		
<i>Консульт.</i>						БГАТУ Шифр				
<i>Н. контр.</i>					<i>Графики изменения координат элементов механизма манипуляции</i>					
<i>Зав. каф.</i>										

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Матвейчук Наталья Михайловна

**ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.
КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *Н. М. Матвейчук*

Корректор *Д. А. Значёнок*

Компьютерная верстка *Д. А. Значёнок*

Дизайн обложки *Д. О. Михеевой*

Подписано в печать 15.10.2025. Формат 60×84¹/₈.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 7,90. Уч.-изд. л. 3,09. Тираж 50 экз. Заказ 363.

Издатель и полиграфическое исполнение:

учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,

распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.