

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» (НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)

Факультет **ФИЗИЧЕСКИЙ**

Кафедра Автоматизация физико-технических исследований

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(научно-исследовательский формат)

Вилейко Иван Вадимович

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы: **Разработка математической модели и алгоритма управления
для системы позиционирования детектора синхротронного излучения**

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

ученая степень, звание

должность, место работы

...../.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....»20...г.

Научный руководитель

ученая степень, звание

должность, место работы

...../.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....»20...г.

Дата защиты: «.....»20...г.

Новосибирск, 2025

Оглавление

Введение.....	3
Постановка цели и задач.....	6
Система позиционирования детектора.....	7
Система технического зрения.....	12
Разработка программы-эмулятора движения детектора для тестирования работы системы управления.....	13
Математическая модель взаимодействия системы технического зрения и системы позиционирования детектора.....	15
Алгоритм позиционирования детектора в рабочее положение в абсолютной системе координат.....	20
Кинематическая и динамическая модели текущей реализации системы позиционирования детектора.....	23
Экспериментальная часть.....	34
Результаты.....	35
Дальнейшие планы.....	35
Список литературы.....	36
Приложение А.....	39
Приложение Б.....	43

Введение

На сегодняшний день одним из самых масштабных и инновационных федеральных проектов Российской академии наук (далее – РАН) является разработка Сибирского кольцевого источника фотонов (далее – СКИФ).

Представленная работа связана с подготовкой к эксплуатации системы управления регистрирующей аппаратурой, расположенной в секции «Динамические процессы» на станции 1-3 Центра коллективного пользования (далее – ЦКП) «СКИФ», показанной на рисунке 1 красным эллипсом. Работа включает в себя реализацию математической модели взаимодействия системы технического зрения и системы позиционирования детектора, кинематическую и динамическую модели текущей реализации системы позиционирования и разработку алгоритмов для её управления.



Рис. 1 – Планируемый общий вид ЦКП СКИФ

На рисунках 2(а) и 2(б) изображена стойка регистрирующей аппаратуры, изготовленная в рамках выполнения хоздоговорных работ между Институтом гидродинамики СО РАН и Институтом автоматики и электрометрии СО РАН, которая предназначена для регистрации быстропротекающих процессов методами рентгеноимпульсной съёмки с помощью высокоскоростных рентгеновских детекторов типа DIMEX [1-4]. Она представляет собой металлический короб, на котором закреплены шкафы управления, системы калибровки и зарезания пучка, а также система

позиционирования детектора (строение стойки представлено на рисунке 2(б)), обозначенная красным прямоугольником на рисунке 2(а), с которой и связана представленная работа.



Рис. 2(а) – Стойка регистрирующей аппаратуры

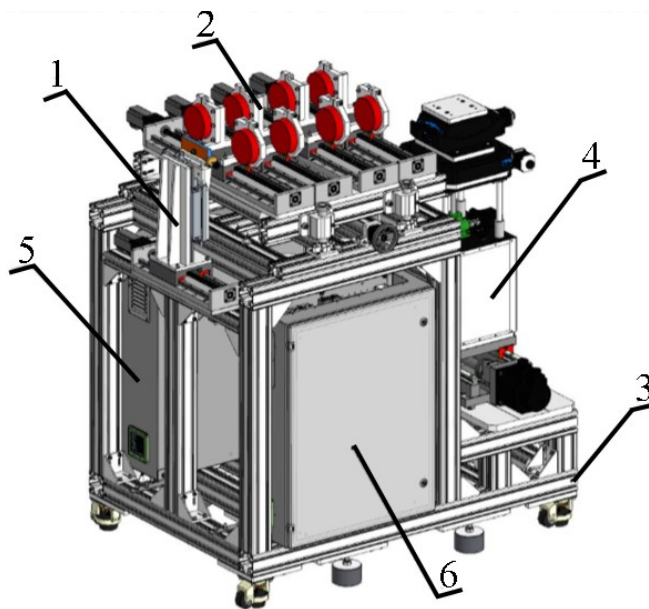


Рис. 2(б) 3D-модель стойки регистрирующей аппаратуры, где:

Рис. 2(б) – 3D-модель стойки регистрирующей аппаратуры, где
 1 – система зарезания рассеянной компоненты пучка, 2 – система калибровки пучка, 3 – крепёжная рама, 4 – система позиционирования детектора, 5,6 – шкафы системы управления

Система позиционирования обеспечивает установку детектора в положение, соответствующее требуемому при различных конфигурациях экспериментальной установки и подстройки положения детектора под существующие на момент проведения эксперимента параметры пучка с точностью до: 0.1° по угловым положениям и порядка 10^{-2} мм по линейным координатам.

Из обсуждений с разработчиками станции стало ясно, что ранее задача позиционирования детектора решалась оператором, задавая положение

подвижек через контроллер вручную, однако в целях сокращения требуемого времени и повышения точности позиционирования было предложено автоматизировать данный процесс. Ранее подобная задача уже решалась с использованием манипуляторных систем в линии распространения пучка NANO-SCOPIUM синхротрона SOLEIL во Франции [5], однако достигнутые этим методом параметры точности не удовлетворяют требуемым на разрабатываемой станции.

Работа системы позиционирования детектора подразумевает удалённое управление системой и отсутствие оператора в зоне проведения эксперимента. В проектируемой системе позиционирования (относительная система координат) представлены четыре степени свободы детектора: координаты Y и Z , лежащие в плоскости, перпендикулярной направлению пучка излучения, вращательную координату с осью вращения, совпадающую с осью Z (ϑ) и вращательную координату, обеспечивающую наклон детектора к направлению распространения пучка излучения (φ), при этом ось вращения параллельна оси Y и пересекает ось Z (рисунок 3).

При проведении экспериментов установка может переконфигурироваться и положение детектора может изменяться, при этом его конечное положение перед проведением эксперимента должно быть настроено под направление распространения пучка излучения, которое происходит вдоль оси X абсолютной системы координат. Поэтому настройка необходима как в плоскости YZ , так и по углам поворота ϑ и φ , а значит необходима привязка текущего положения детектора к неподвижной точке. Эта точка представлена системой технического зрения, жёстко привязанной к области помещения, в котором будут проводиться эксперименты («камера системы технического зрения» на рисунке 3), в дальнейшем – абсолютная система координат.

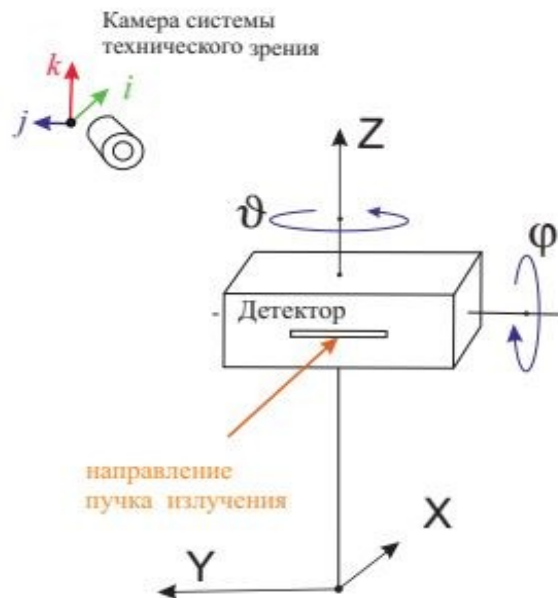


Рис. 3 – Оси координат системы позиционирования детектора

Постановка цели и задач

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы управления для позиционирования детектора синхротронного излучения.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- Создать математическую модель системы позиционирования детектора для разработки программы-эмулятора этой системы и алгоритмов согласованного управления перемещением детектора и настройки его в рабочее положение;
- Создать физическую модель системы позиционирования детектора синхротронного излучения для оценки динамических характеристик системы;
- Разработать алгоритм позиционирования детектора с обратной связью по положению детектора;
- Разработать алгоритм позиционирования детектора с обратной связью по сигналу интенсивности с детектора;
- Реализовать программу-эмулятор движения детектора для тестирования работы системы позиционирования.

Система позиционирования детектора

Объектом позиционирования является высокоскоростной рентгеновский детектор типа DIMEX. Предполагается использовать два вида детекторов: DIMEX-G [1], DIMEX-Si [3, 4].

Детектор DIMEX-G представляет собой ионизационную камеру высокого давления со считывающей структурой из полосок с шагом 0.15 мм. Сколмированный по вертикали пучок СИ попадает в чувствительный объём детектора через входное окно из бериллия толщиной 1 мм. В зависимости от типа эксперимента пучок имеет размер по вертикали от 0.1 мм до 1 мм и по горизонтали до 100 мм. Пучок СИ попадает в газовый объём между двумя параллельными электродами (рисунок 4): высоковольтным дрейфовым электродом, на который подаётся отрицательный потенциал, и полосковой считывающей плоскостью, полосы которой направлены параллельно направлению пучка. Детектор наполнен смесью Хе-СО₂ (3-1) при абсолютном давлении 7 атм, глубина чувствительного объёма в направлении пучка составляет 30 мм. Быстрая регистрация сигнала от каждого электронного сгустка обеспечивается тем, что сигнал записывается в аналоговую память во время эксперимента, а оцифровка и вычитывание происходит после окончания измерений. Каждая полоска считывающей структуры детектора подключена к входной площадке специализированной интегральной схемы DMXG64В (в данном детекторе применено 11 таких интегральных схем), которая включает 64 канала, каждый из которых состоит из малoshумящего интегратора на входе и 100 ячеек аналоговой конвейерной памяти.

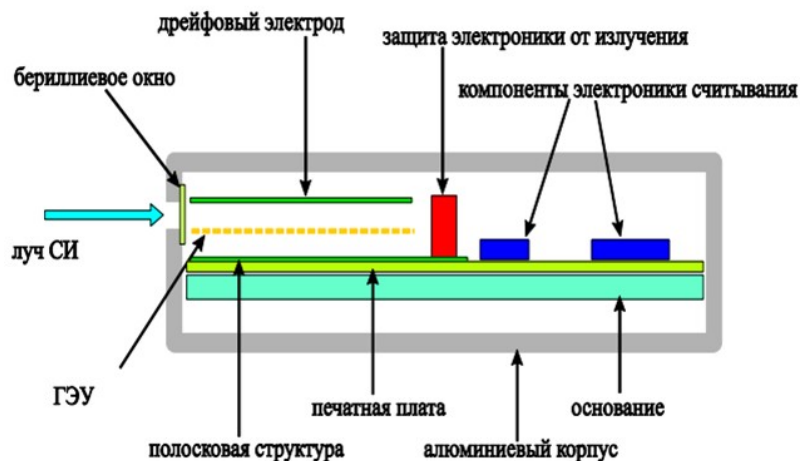
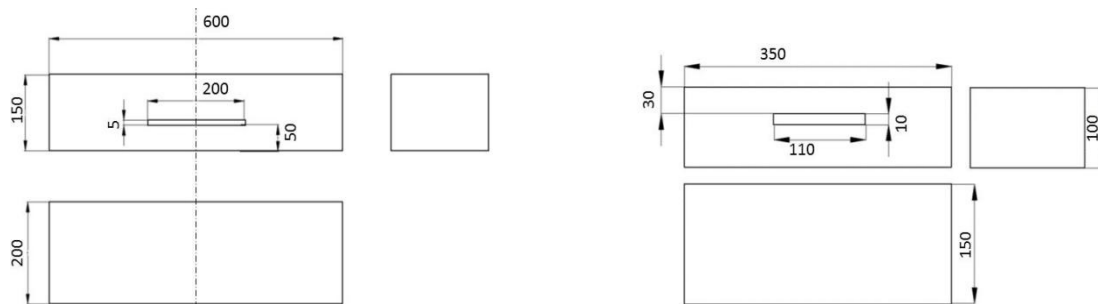


Рис. 4 – Схема компоновки детектора DIMEX-G

Кроме того, чип содержит выходной аналоговый мультиплексор, через который все каналы могут быть последовательно прочитаны. Детектор обеспечивает скорость регистрации – до 10^7 кадров в секунду и временное разрешение – 50 нс, число пространственных каналов – 660, пространственное разрешение – 0.25 мм. Синхронизация начала записи сигнала осуществляется внешним сигналом.

Габаритные размеры детектора, размер и расположение входного окна показаны на рисунке 5(а). Масса детектора 15 кг.



Детектор DIMEX-Si обеспечивает лучшие по сравнению с DIMEX-G параметры по скорости регистрации и временному разрешению ($5 \cdot 10^7$ и 10 нс соответственно), числу пространственных каналов (2048) и пространственному разрешению (0.15 мм).

Детектор включает в себя однокоординатный микрополосковый кремниевый сенсор, расположенный под малым углом к пучку СИ ($1.7 - 2^\circ$), платы регистрации со специализированными интегральными схемами DMXS64, материнскую плату с ПЛИС управления и хранения данных, а также с источниками питания и интерфейсом ETHERNET для передачи данных в компьютер и управления детектором. Схема компоновки детектора показана на рисунке 6, габариты детектора, размер и положение окна показаны на рисунке 5(б). Масса детектора 5 кг.

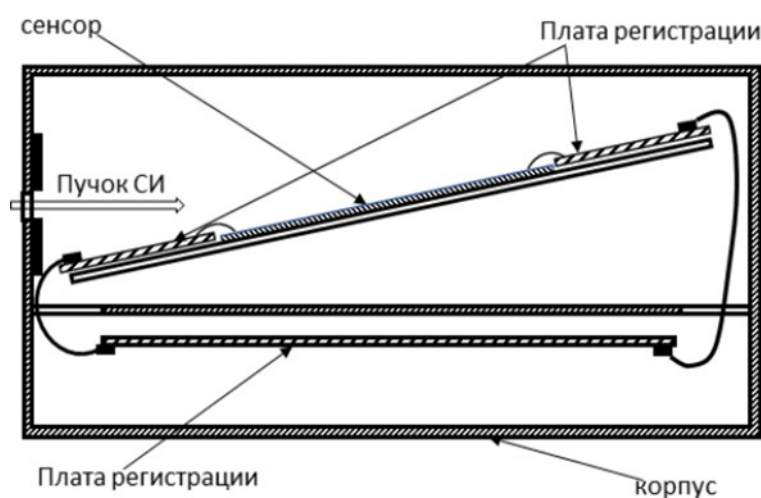


Рис. 6 – Схема компоновки детектора DIMEX-Si

Текущая техническая реализация системы позиционирования детектора приведена на рисунке 7.

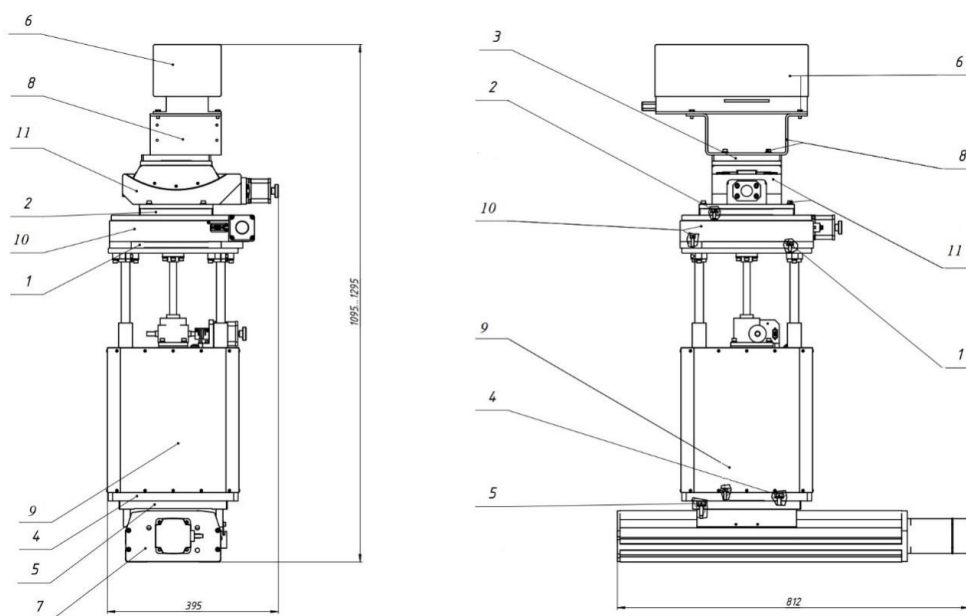


Рис. 7 – Текущая реализация системы позиционирования детектора:
 (1-5) – переходные крепежные пластины, 6 – детектор, 7 – сервопривод оси Y, 8 – скоба крепления детектора, 9 – привод вертикального перемещения детектора по Z, 10 – привод горизонтального вращения детектора по ϕ , 11 – привод наклона детектора по θ

Имеется шкаф управления, где установлен промышленный контроллер на базе микропроцессорного модуля, который управляет приводами системы позиционирования. Каждый моторизированный позиционер имеет драйвер, который преобразует управляющий сигнал от контроллера в силовые импульсы тока, задающие направление, скорость и позволяющие позиционировать вал двигателя. Для передачи управляющих сигналов между драйвером и контроллером используется промышленный протокол передачи данных Modbus.

Привод оси Y (рисунок 8(а)) выполнен на основе модуля линейного перемещения KT-10020C-1080-A1-F4CS2 [7] с диапазоном перемещения 928 мм, серводвигателя на постоянных магнитах (PMSM) 110ST-M04030 [6] и драйвера сервопривода QS7AA030M.

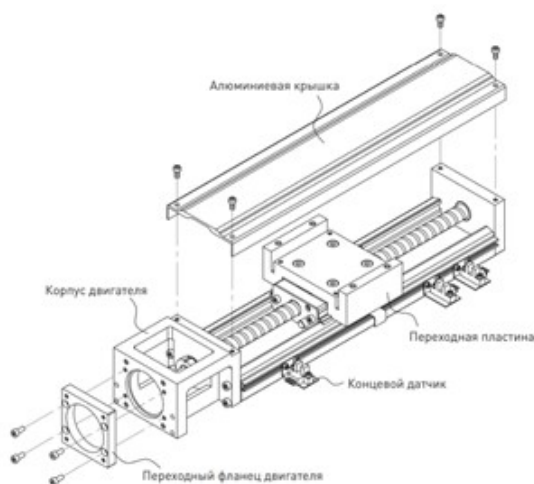


Рис. 8(а) – Модуль линейного перемещения привода Y – KT-10020C-1080-A1-F4CS2

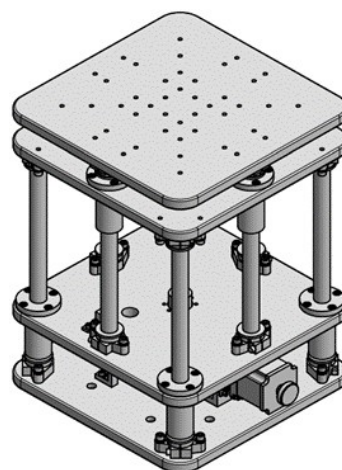


Рис. 8(б) – Модуль линейного перемещения привода Z – MOZ-300-200-H

В качестве привода вертикального перемещения (рисунок 8(б)) использован моторизованный подъёмный стол MOZ-300-200H [8] с шаговым двигателем типоразмера NEMA23 и диапазоном перемещения платформы 200 мм.

Вращение детектора вокруг оси Z обеспечивается поворотной платформой MOR-300 (рисунок 9а) с приводом от шагового двигателя типоразмера NTMA23 и диапазоном перемещения 360° , наклон детектора производится посредством моторизованного гониометра MOG-160-15 (рисунок 9(б)) с вынесенной осью вращения и диапазоном углов наклона $\pm 15^\circ$ [8].

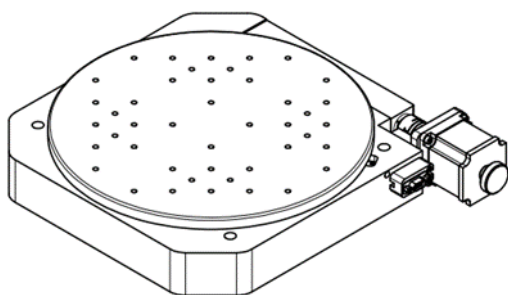


Рис. 9(а) – Модуль привода углового перемещения по θ – MOR-300-A



Рис. 9(б) – Модуль привода углового перемещения по φ – MOG-160-15

Система технического зрения

В представленной работе в качестве системы технического зрения использовалась камера Logitech 920 с максимальным разрешением 1920×1080 . Объектом, по которому определяется текущее положение и ориентация детектора относительно камеры, является маркер ArUco, установленный на корпусе детектора.

Маркер ArUco – синтетический квадратный маркер, состоящий из широкой чёрной рамки и внутренней двоичной матрицы, которая определяет его идентификатор. Чёрная рамка облегчает его быстрое обнаружение на изображении, а двоичная кодировка позволяет идентифицировать его и применять методы обнаружения и исправления ошибок [9]. Обнаружение и получение текущей позиции маркера ArUco выполняется с помощью одноимённого модуля, представленного в библиотеке с открытым исходным кодом для работы с алгоритмами компьютерного зрения OpenCV.

Процесс обнаружения маркеров состоит из двух основных этапов:

- Обнаружение потенциальных маркеров. На этом этапе изображение, полученное с камеры, анализируется с целью поиска квадратных фигур, которые могут быть потенциальными маркерами. Сначала выполняется адаптивное пороговое преобразование для сегментации маркеров [10], затем из порогового изображения извлекаются контуры, и те из них, которые не являются выпуклыми или не приближаются к квадратной форме, отбрасываются. Также применяется дополнительная фильтрация: удаление слишком маленьких или слишком больших контуров и удаление контуров, расположенных слишком близко друг к другу.
- После обнаружения кандидатов необходимо определить, действительно ли они являются маркерами, проанализировав их внутреннюю кодировку. Этот этап начинается с извлечения битов из маркера. Для этого сначала применяется перспективное

преобразование [11], чтобы получить маркер в канонической форме. Затем каноническое изображение пороговым методом Otsu [12] разделяется на белые и чёрные биты. Изображение делится на ячейки в соответствии с размером маркера и размером границы, и количество чёрных или белых пикселей в каждой ячейке подсчитывается, чтобы определить значение бита, 0 или 1 соответственно. Наконец, биты анализируются, чтобы определить идентификатор текущего маркера.

После обнаружения маркера необходимо получить информацию о положении камеры. Это положение находится относительно выбранного произвольным образом нуля. Считая, что камера откалибрована, а значит получены: матрица камеры (внутренние параметры камеры – координаты центра камеры и фокусные расстояния) и коэффициенты искажения (вектор, моделирующий искажение, создаваемое камерой), положение камеры относительно маркера – это трёхмерное преобразование из системы координат маркера в систему координат камеры. Для нахождения вращений и векторов перемещения, которыми задаётся преобразование координат, используется итеративный метод SOLVEPNP_ITERATIVE, основанный на оптимизации Левенберга-Марквардта [13]. В этом случае происходит поиск такой позы, которая минимизирует ошибку репроекции, то есть сумму квадратов расстояний между наблюдаемыми проекциями и спроецированными точками объекта. Входными параметрами являются: набор точек объекта, проекции этих точек на изображение, матрица камеры и коэффициенты искажения. Выходными параметрами являются текущее положение и ориентация маркера.

Разработка программы-эмулятора движения детектора для тестирования работы системы управления

На данном этапе стойка регистрирующей аппаратуры находится на этапе проектирования и предварительной сборки, поэтому для того, чтобы

максимально ускорить процесс введения её в эксплуатацию, необходимо разработать программное обеспечение (далее – ПО) для управления системой позиционирования детектора без имеющейся аппаратной части. Так как возможности проверки и отладки алгоритмов работы на реальном оборудовании сейчас нет, но есть установленные сроки работы, необходимо разработать программу-эмулятор движения детектора, которая будет как можно точнее повторять поведение реальной установки – системы позиционирования детектора синхротронного излучения.

Для реализации алгоритмов управления и интеграции программы-эмулятора в разрабатываемое ПО была предложена следующая схема его работы, показанная на рисунке 10:

- Контроллер:
 - Перемещение подвижек на заданный интервал;
 - Получение текущих координат от системы технического зрения и передача их алгоритмической части.
- Алгоритмическая часть:
 - Рассчитывает необходимые смещения в относительной системе координат для достижения значений, заданных в абсолютной системе координат.
- Программа-эмулятор, разработанная таким образом, чтобы максимально приблизить процесс позиционирования детектора к реальным условиям:
 - Рассчитывает значения смещений в относительной системе координат с учётом того, что реальные направления осей абсолютной и относительной систем координат будут отличаться;
 - Задаются углы ошибки между осями X, Y, Z абсолютной и относительной координат для лучшего симулирования поведения системы. В реальности этот угол знать

необязательно, так как алгоритм поиска смещений работает итеративно с обратной связью по положению детектора (подробнее см. в разделе «Алгоритм позиционирования детектора в рабочее положение в абсолютной системе координат»).



Рис. 10 Схема работы разрабатываемого ПО

Для реализации программы-эмулятора необходимо разработать математическую модель взаимодействия системы технического зрения и системы позиционирования детектора.

Математическая модель взаимодействия системы технического зрения и системы позиционирования детектора

В зависимости от эксперимента, проводимого на станции «Быстропротекающие процессы», стойка регистрирующей аппаратуры может располагаться на линии распространения пучка, либо находиться вне этой линии. Каждый раз, когда стойку придвигают в линию, расхождение направлений осей системы подвижек будет порядка нескольких градусов. Но необходимо с заданной точностью настроить детектор под пучок синхротронного излучения, а значит необходима абсолютная система координат, положение которой не зависит от проводимого эксперимента. В качестве такой системы была выбрана система технического зрения (камера), расположенная неподвижно в области помещения, в котором будет

проводится эксперимент. Поэтому одной из основных задач была разработка модели взаимодействия системы технического зрения (абсолютная система координат) и системы подвижек (относительная система координат).

Данная модель, как отмечалось ранее, необходима для разработки программы-эмулятора системы позиционирования, а также для решения обратной задачи кинематики, а именно – определение требуемых смещений приводов позиционирования детектора для достижения заданной в абсолютной системе координаты. И, как следствие, по этой модели строится реализация алгоритма «грубой» настройки детектора в «рабочее положение» перед проведением эксперимента.

Сложность модели заключается в том, что оси абсолютной системы координат, представленной камерой, и оси относительной системы в реальности будут отличаться, как показано на рисунке 11, в силу неточностей проектирования системы, а также из-за ошибок, вызванных ручной установкой стойки регистрирующей аппаратуры при проведении эксперимента.

Разрабатывая математическую модель системы, необходимо определить входные и выходные параметры модели. На вход разрабатываемой математической модели от управляющего контроллера приходит текущее положение и ориентация детектора в абсолютной системе координат. На корпусе детектора установлена метка, в случае данной работы – ArUco маркер, по изображению которого система технического зрения получает смещение детектора по поступательным (x , y , z) и вращательным (φ , θ , ψ) осям. Также на вход модели поступает вектор координат, определяющих требуемое положение детектора (также в абсолютной системе координат). Это положение определено для текущего эксперимента. Для того, чтобы максимально приблизить работу эмулятора к поведению реальной установки, в модель также приходят значения углов отклонения осей Y , Z , так как в общем случае оси относительной системы не ортогональны (рисунок 11). Выходными же параметрами модели являются

смещения приводов, полученные в относительной системе и представленные в виде:

$r_{offset} = (y_{offset}, z_{offset}, \varphi_{offset}, \vartheta_{offset})^T$. Эти смещения необходимы для достижения заданной в абсолютной системе координат точки.

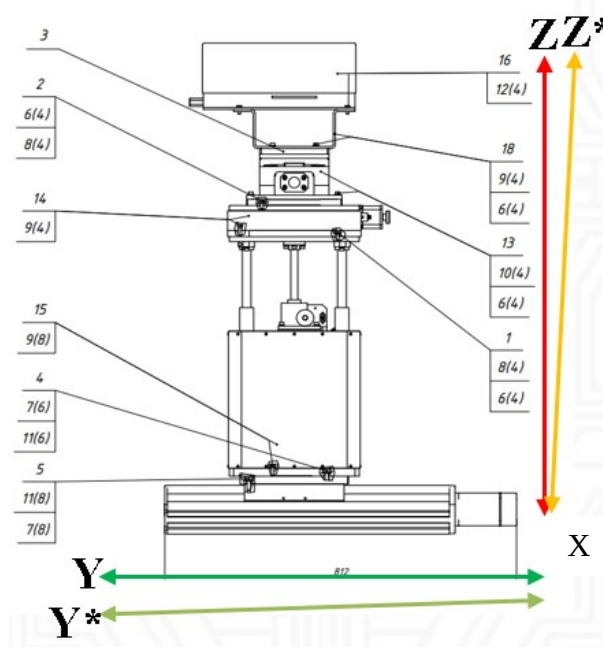


Рис. 11 – Пример направления осей абсолютной и относительной систем координат в реальных условиях

Для того, чтобы правильно учесть неортогональность осей Y и Z относительной системы координат при подсчёте итоговых смещений приводов для достижения заданной координаты, необходимо выполнить следующие преобразования:

- Ортогональная СК – СК, в которой оси относительной системы ортогональны и сонаправлены с осями абсолютной системы координат (оси X, Y, Z на рисунке 11), обозначим её B_2 .
- Неортогональная СК, обозначим её B_1 : в ней интересующие нас оси Y, Z , по которым происходит перемещение, не перпендикулярны (оси X, Y^*, Z^* на рисунке 11), но, так как нам изначально известны углы β, γ – углы наклона «реальных» осей Y, Z соответственно относительно идеальных, которые оси B_1 образует с соответствующими осями системы B_2 , эти углы известны как

параметры эмулятора. Важно упомянуть, что оси X систем совпадают и плоскость YZ системы B_1 перпендикулярна оси X тогда базисные вектора системы B_1 известны в координатах B_2 .

- Также нам необходимо знать положение начала координат O_1 системы B_1 относительно начала координат O_2 системы B_2 . В случае данной системы вектор относительного смещения начала системы координат O_1 относительно O_2 нулевой.
- Тогда преобразование координат Y, Z системы B_2 в B_1 записывается следующим образом:

$$\begin{cases} y_{offset_real} = y_{offset} \cdot \cos(\beta) + z_{offset} \cdot \sin(\gamma) \\ z_{offset_real} = z_{offset} \cdot \cos(\gamma) + y_{offset} \cdot \sin(\beta) \end{cases}$$

- для того, чтобы правильно выполнить поворот системы на φ_{offset} , ϑ_{offset} необходимо ортогонализировать систему B_1 . Для этого будем использовать QR-разложение [14], где Q – матрица нового ортогонального базиса, R – матрица перехода к полученной ортогонализированной системе. QR-разложение эквивалентно процессу ортогонализации Грамма-Шмидта [15]. Пусть даны вектора \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 , \mathbf{a}_3 в неортогональной системе координат, тогда:

$$q_1 = \frac{\mathbf{a}_1}{|\mathbf{a}_1|} - \text{первый базисный вектор новой системы,}$$

$$q_2 = \frac{\mathbf{a}_2 - (\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{q}_1) \mathbf{q}_1}{\sqrt{\mathbf{a}_2 - (\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{q}_1) \mathbf{q}_1} \sqrt{\mathbf{a}_2 - (\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{q}_1) \mathbf{q}_1}} - \text{второй базисный вектор новой системы,}$$

$$q_3 = \frac{\mathbf{a}_3 - (\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{q}_1) \mathbf{q}_1 - (\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{q}_2) \mathbf{q}_2}{\sqrt{\mathbf{a}_3 - (\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{q}_1) \mathbf{q}_1 - (\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{q}_2) \mathbf{q}_2} \sqrt{\mathbf{a}_3 - (\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{q}_1) \mathbf{q}_1 - (\mathbf{a}_3 \cdot \mathbf{q}_2) \mathbf{q}_2}} - \text{третий базисный вектор новой системы.}$$

Ортогонализовав систему B_1 и получив систему Q и матрицу перехода R, можем перейти в систему B_2 для дальнейшего вращения на заданные в B_2 углы φ_{offset} , ϑ_{offset} .

$$R_Y(\varphi_{offset}) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_{offset} & 0 & \sin \varphi_{offset} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_{offset} & 0 & \varphi_{offset} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R_Z(\vartheta_{offset}) = \begin{pmatrix} \cos \vartheta_{offset} & -\sin \vartheta_{offset} & 0 \\ \sin \vartheta_{offset} & \cos \vartheta_{offset} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

- тогда, используя матрицы вращения вокруг осей Y (1) и Z (2), итоговые вращения можно найти так:

$$R_{total} = R \cdot R_Y(\varphi) \cdot R_Z(\vartheta) \cdot R^{-1}$$

Все преобразования были выполнены с помощью одной из библиотек языка программирования Python – Numpy [16], так как в ней уже реализованы методы ортогонализации и настроена эффективная работа с матрицами.

Теперь, зная как изменяются смещения подвижек с наклоном осей относительной системы, можем найти связь начального и конечного векторов координат детектора в абсолютной системе. Пусть даны $r_{start} = (x_{start}, y_{start}, z_{start})^T$ – начальный вектор координат детектора в абсолютной системе отсчёта, $r_{start\ orientation} = (\psi_{start}, \varphi_{start}, \vartheta_{start})^T$ – начальная ориентация детектора в абсолютной системе отсчёта; $r_{end} = (x_{end}, y_{end}, z_{end})^T$ – вектор координат, в который необходимо установить детектор (также в абсолютной системе координат), $r_{end\ orientation} = (\psi_{end}, \varphi_{end}, \vartheta_{end})^T$ – конечная ориентация детектора в абсолютной системе отсчёта. Тогда r_{offset} – искомый вектор смещения подвижек (в относительной системе координат), используя (1, 2), связан с векторами координат детектора следующим образом [17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{end} = R_Y(\varphi_{offset}) \cdot R_z(\vartheta_{offset}) \cdot \left(r_{start} + \begin{pmatrix} 0 \\ y_{offset} \\ z_{offset} \end{pmatrix} \right) \\ r_{end\ orientation} = r_{start\ orientation} + \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_{offset} \\ \vartheta_{offset} \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (3)$$

Так как данная система аналитически не решается, было предложено использовать численные методы для решения задачи позиционирования детектора в рабочее положение в абсолютной системе координат.

Алгоритм позиционирования детектора в рабочее положение в абсолютной системе координат

Алгоритм установки детектора в рабочее положение состоит из алгоритма «грубой» настройки детектора, где под «грубой» настройкой понимается установка детектора в требуемую позицию с точностью, обеспечиваемой системой позиционирования, на основе численного метода нахождения относительных перемещений для достижения требуемого пространственного и углового положения в абсолютной системе координат с обратной связью по камере технического зрения; а также алгоритма «точной» настройки, где под «точной» настройкой понимается подстройка детектора под существующие на данный момент параметры пучка (по величине и форме сигнала интенсивности, получаемого от детектора). Сначала детектор будет двигаться по вертикали, измеряя зависимость сигнала от координаты, затем детектор будут поворачивать вокруг вертикальной оси, измеряя ширину границы непрозрачного края. Настройка производится до достижения минимума ширины границы непрозрачного края.

Алгоритм «грубой» настройки детектора основан на итерационном квазиньютоновском методе численной оптимизации BFGS, названном в честь исследователей, работающих над этим методом: Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno. Для реализации данного алгоритма необходим метод:

- масштабируемый (так как существует вероятность высокой размерности вычислений),
- достаточно устойчивый к выбору начального приближения,
- с возможностью использования в многомерных случаях,
- поддерживающий ограничения, задаваемые на переменные (для уменьшения размерности вычислений).

Так как алгоритм «грубой» настройки, схема которого показана на рисунке 12, первоначально был написан на языке программирования Python с использованием библиотеки SciPy с открытым исходным кодом, в которой предоставлены алгоритмы для оптимизации, интегрирования, интерполяции, задач на собственные значения, алгебраических уравнений, дифференциальных уравнений, статистики и многих других классов задач [18], была выбрана модификация вышеупомянутого метода численной оптимизации – L-BFGS-B с ограниченным использованием по памяти (метод поддерживает введение ограничений на переменные) в многомерном случае. Сравнение доступных методов модуля optimize библиотеки SciPy приведено в приложении А, таблица 1.

Принцип работы данного численного метода следующий:

- Сначала необходимо инициализировать начальную точку x_0 :
в текущей реализации алгоритма эта точка будет иметь 4 координаты (сколько и в относительной системе координат), поэтому строится сетка по каждой из координат с шагом, много большим, чем минимальный шаг подвижки, и для каждой точки, используя систему (3), вычисляется координата точки в абсолютной системе отсчёта и в качестве начальной точки берётся ближайшая к целевому значению. При этом в качестве начального приближения в методе используется обратный гессиан функции, вычисленный в точке x_0 [19]. Был выбран шаг сетки – 500 мкм для поступательных приводов,

0.5° для вращательных, минимальный шаг поступательный подвижки – 10 мкм, вращательной – 10^{-2} °.

- Также необходимо выбрать целевую функцию, имеющую непрерывные вторые производные для корректной работы алгоритма. В данной реализации в качестве целевой функции была выбрана сумма квадратов ошибок текущей координаты от целевой. Используя разработанную математическую модель взаимодействия системы технического зрения и системы позиционирования детектора, подставляем полученное на текущем шаге приближение в систему (3) и пересчитываем его координаты в абсолютную систему отсчёта и определяем разницу с целевыми координатами.

- После этого необходимо найти точку, в направлении которой будет производиться поиск. Эта точка определяется следующим образом:

$p_k = -H_k \cdot \nabla f_k$, где k – номер шага, H_k – приближение на текущем шаге (обратный гессиан, вычисленный в точке x_k). Тогда можем вычислить следующее положение системы x_{k+1} , используя рекуррентное отношение: $x_{k+1} = x_k + \alpha_k \cdot p_k$,

где $\alpha_k = \frac{1}{y_k^T \cdot s_k}$ – коэффициент, удовлетворяющий условиям Вольфе [20].

Фактически мы находим такой α_k , при котором значение $f(x_k + \alpha_k \cdot p_k)$ минимально.

- Далее определяем вектора $s_k = x_{k+1} - x_k$ – шаг алгоритма на итерации и $y_k = \nabla f_{k+1} - \nabla f_k$ – изменение градиента на итерации для обновления гессиана функции, используя следующую формулу:

$$H_{k+1} = (I - \alpha_k \cdot s_k \cdot y_k^T) \cdot H_k \cdot (I - \alpha_k \cdot y_k \cdot s_k^T) + \alpha_k \cdot s_k \cdot s_k^T,$$

где I – единичная матрица.

- Алгоритм выполняется, пока модуль разности целевых функций на текущем и предыдущем шагах не будет входить в заданный диапазон точности.

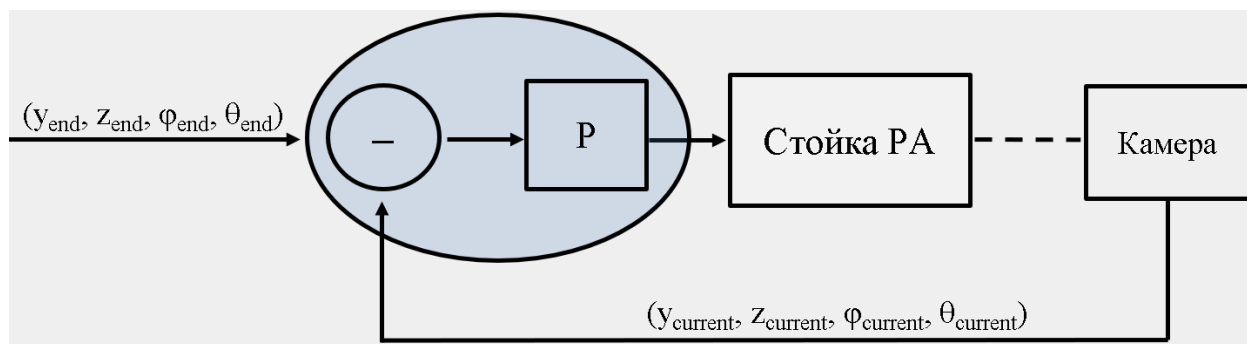


Рис.12 – Схема работы алгоритма «грубой» настройки детектора в рабочее положение

Для взаимодействия программы, высчитывающей смещения с контроллером, используется протокол обмена данными MQTT.

Алгоритм «точной» настройки детектора по величине сигнала интенсивности пучка с детектора и ширине границы изображения непрозрачного края на данном этапе работы выполняется оператором, однако в дальнейшем предполагается автоматизация этого процесса и использование алгоритма, схема которого представлена на рисунке 13.

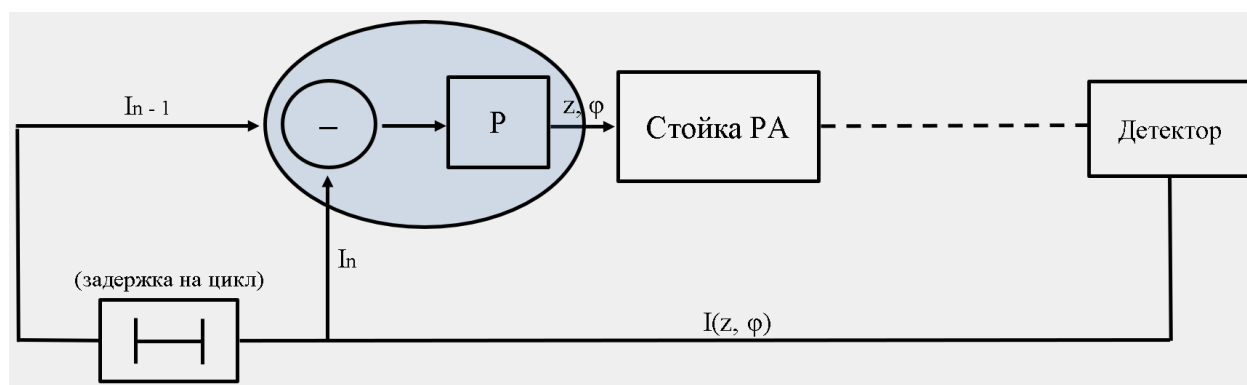


Рис. 13 – Схема работы алгоритма «точной» настройки детектора в рабочее положение

Кинематическая и динамическая модели текущей реализации системы позиционирования детектора

Целью построения кинематической модели системы позиционирования является определение соотношений между значениями прямолинейных поступательных и вращательных перемещений объекта от угловых положений валов двигателей приводов и определение линейных и угловых

скоростей перемещения объекта от скоростей вращения двигателей приводов.

Целью построения динамической модели системы позиционирования является оценка рекомендуемых скоростных параметров приводов системы позиционирования детектора при принятых при проектировании системы позиционирования конструктивных решениях, массах и габаритах элементов системы, оценка оптимальности типов применяемых двигателей и параметров управления приводами двигателей (достижимые ускорения и скорости перемещений приводов, стартовые частоты шаговых двигателей). Это необходимо для настройки драйверов, используемых для приводов в данной системе.

В качестве исходных данных для построения кинематической и динамической моделей были взяты данные, приведённые производителями в характеристиках использованных приводов и двигателей [6-8, 22, 23], а также конструктивные решения, использованные при разработке текущей реализации системы позиционирования детектора, схематически показанные на рисунке 14.

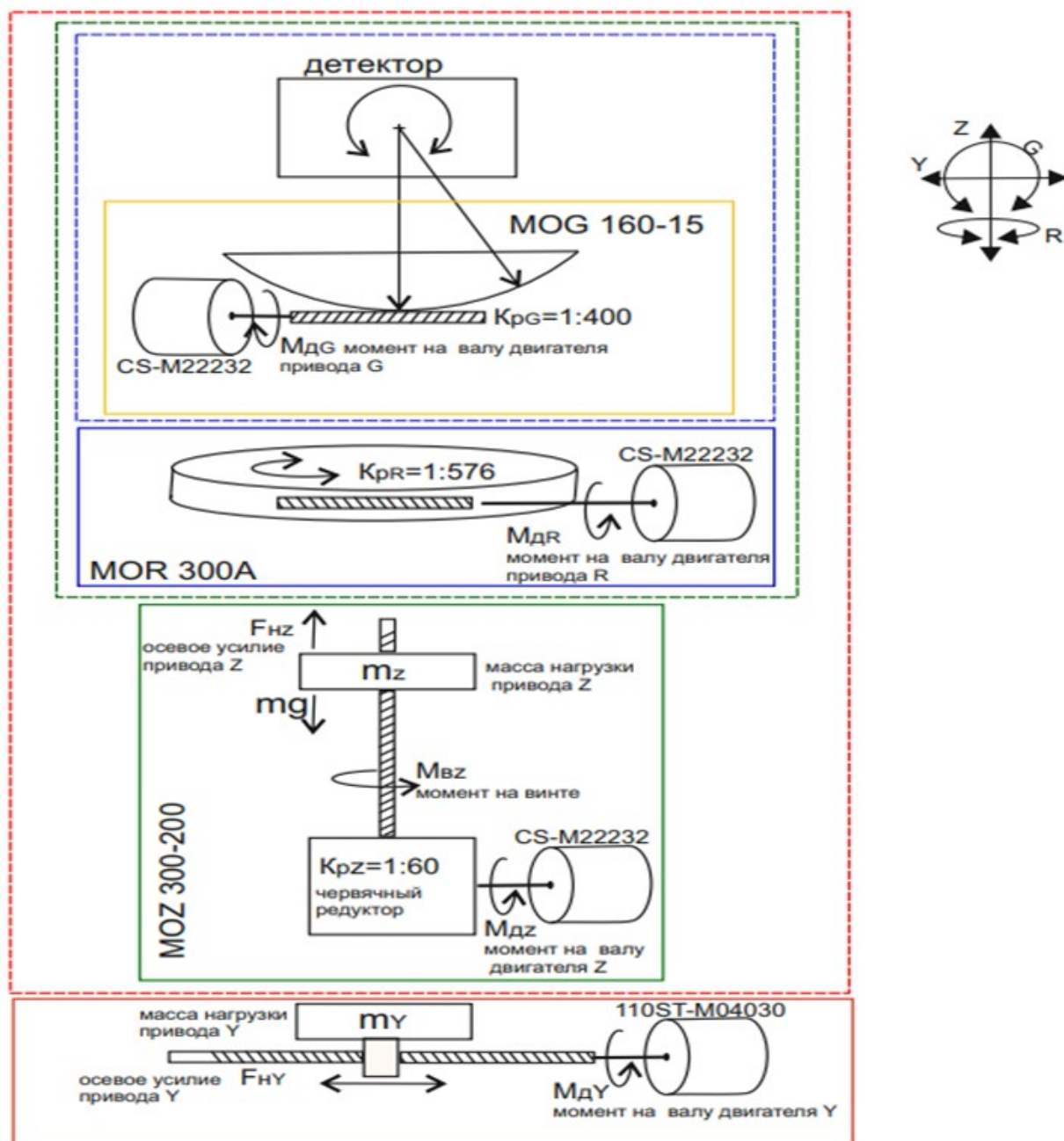


Рис. 14 – Конструктивная компоновка системы позиционирования детектора

Привод Y выполнен по кинематической схеме шарико-винтовой пары (ШВП). Из справочных данных для модуля линейного перемещения КТ-10020С-1080-А1-F4СS2: радиус винта $r=20\text{ мм}$, шаг винта $p_Y=20\text{ мм}$, диапазон перемещения $l_Y=928\text{ м}$, номинальная скорость вращения двигателя $\omega_{MY}=3000\text{ об/мин}$. Таким образом, поступательная скорость движения каретки по винту может составлять $V_y = \omega_{MY} \cdot \frac{p_Y}{60} = 1\text{ м/с}$.

Привод вертикального перемещения (Z) выполнен по схеме ШВП с передачей движения от двигателя на винт ШВП через червячный редуктор с коэффициентом редукции $K_{pz} = \frac{1}{60}$, при этом радиус винта $r_z = 16 \text{ мм}$, шаг винта $p_z = 5 \text{ мм}$, а диапазон перемещения – 200 мм. В приводе используется шаговый двигатель, работающий в полушаговом режиме. Угловое перемещение на один импульс управления в режиме полушага составляет 0.9° и количество шагов на один оборот вала двигателя $n = 400$. Таким образом, скорость линейного перемещения платформы V_z и расстояние перемещения за N шагов двигателя $L_z(N)$ составят:

$$V_z = f_{ST} \cdot p_z \cdot \frac{K_{pz}}{n} \text{ и } L_z(N) = N \cdot p_z \cdot \frac{K_{pz}}{n},$$

где f_{ST} – частота шагов, N – количество шагов перемещения.

Частота шагов (частота подачи управляющих импульсов на драйвер шагового двигателя) зависит от типа двигателя, режимов его работы, нагрузки на валу двигателя и оценивается при рассмотрении динамической модели привода.

Аналогично, для приводов угловых перемещений по ϑ и φ напомним для скорости углового перемещения объекта:

$$\omega_{\vartheta} = f_{ST} \cdot \vartheta_{ST} \cdot \frac{K_{PR}}{n}, \quad \vartheta(N) = N \cdot \vartheta_{ST} \cdot \frac{K_{PR}}{n},$$

где f_{ST} – частота шагов, $\vartheta(N)$ – угловое перемещение объекта за N шагов двигателя, ϑ_{ST} – угол единичного перемещения (шага) двигателя по координате ϑ , K_{PR} – коэффициент редукции в приводе координаты ϑ . Для использованного нами привода MOR-300-A, коэффициент редукции $K_{PR} = \frac{1}{576}$, $n = 400$.

Так же для привода по координате φ :

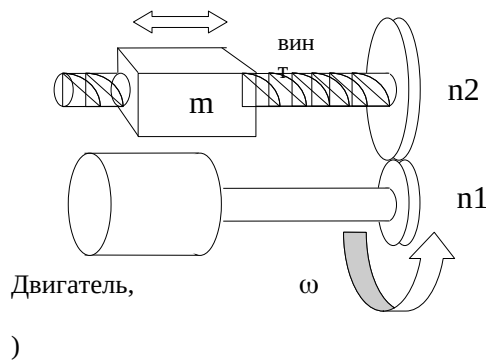
$$\omega_{\varphi} = f_{ST} \cdot \varphi_{ST} \cdot \frac{K_{PG}}{n}$$

Для привода MOG 160-15, коэффициент редукции $K_{PG} = \frac{1}{400}$.

Допустимые частоты подачи шагов определяются при рассмотрении динамической модели с учётом моментов инерции нагрузки приводов вращательного движения.

Для оценки скоростных и нагрузочных характеристик приводов, кроме кинематических параметров передач приводов, необходимо определить массы нагрузки приводов, моменты инерции нагрузки, действующие в системе моменты сил.

На рисунке 15 представлена общая схема винтовой передачи с редуктором между осью двигателя и винтом. Коэффициент редукции равен $\frac{n_1}{n_2}$.



ω – угловая скорость вала двигателя,

m – полная масса нагрузки на каретке,

$\frac{n_1}{n_2}$ – передаточное отношение

редуктора,

$M(i, \omega)$ – вращающий момент

двигателя в зависимости от

угловой скорости вала ω и тока

Рис. 15 – Обобщенная схема передачи винт-гайка с редуктором

При рассмотрении такой схемы необходимо привести все моменты инерции и внешние силы (сила тяжести для случая привода по Z в нашей системе позиционирования) в соответствующей размерности к валу двигателя и воспользоваться уравнением вращательного движения:

$$M(i, \omega) = J_T \times \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + D_T \times \frac{\partial \theta}{\partial t} + M_f + M_d, \quad (4)$$

где $M(i, \omega)$ – момент двигателя, зависимость от тока в обмотке i и скорости вращения ω , J_T – приведённый к валу двигателя момент инерции системы, θ – угол поворота вала двигателя, D_T – коэффициент вязкого (зависящего от скорости) трения, M_f – коэффициент сухого трения в размерности момента сил, M_d – фиксирующий момент (detent torque).

Моменты инерции, приводимые к валу двигателя:

- J_{rot} – момент инерции ротора двигателя,
- J_{n_1} – момент инерции шестерни n_1 и соединительной муфты,
- J_{n_2} – момент инерции шестерни n_2 ,
- J_s – момент инерции винта,
- J_m – приведенный к оси винта момент инерции массы каретки.

Будем использовать следующие размерности величин:

- сила – Н,
- вращающий момент – Н·м,
- масса – кг,
- расстояние – м,
- момент инерции – кг·м²,
- угловая скорость – рад/с.

Приведение массы каретки к оси винта можно сделать из соображений равенства кинетических энергий, принимая линейную скорость по винту пропорциональной шагу винта p , а линейную скорость по витку резьбы пропорциональной $2\pi \cdot r_{average}$, где $r_{average}$ – средний радиус по резьбе винта:

$$J_m = \frac{m \left(\frac{p}{2\pi \cdot r_{average}} \right)^2}{\frac{1}{r_{average}^2}} = m \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2 \quad (5)$$

Момент инерции винта J_s вычисляется как момент инерции цилиндра:

$$J_s = \frac{1}{2} m_s \frac{r_{cp}^2}{2} = \pi \frac{r_{cp}^4}{4} l_s \cdot P_v,$$

где l_s , m_s – длина и масса винта, P_v – плотность материала винта (для стали ~ 7.8 г/см³)

Приведение соответствующих моментов инерции к оси двигателя через зубчатую передачу производится из соображений равенства кинетических энергий, моменты инерции приводятся с коэффициентом $\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$, вращательный момент и скорость вращения переводятся с коэффициентом $\frac{n_1}{n_2}$.

Таким образом, суммарный момент инерции, приведённый к валу двигателя:

$$J_T = J_{rot} + J_{n_1} + J_{n_2} \quad (6)$$

Для того, чтобы оценить максимальную стартовую частоту шагов, запишем из условия сохранения энергии:

$$(M(i, \omega) - M_f - M_d) \cdot \theta = J_T \cdot \frac{\omega^2}{2}, \text{ где } \theta \text{ – угол поворота вала двигателя,}$$

$$\omega = \sqrt{\left(2\theta \cdot \frac{(M(i, \omega) - M_f - M_d)}{J_T} \right)} \quad (7)$$

или в размерности частоты подачи шагов, принимая угол θ_1 углу единичного шага,

$$f_{start} = \omega \cdot \frac{180}{\pi \cdot \theta_1}, \quad (8)$$

Угол единичного шага здесь в размерности градус (°), частота в Гц.

В справочных данных шаговых двигателей, как правило, приводятся графики зависимости момента двигателя от рабочей частоты подачи шагов, подобные приведённым на рисунке 16. Однако приводимые в справочных данных кривые относятся только к тем условиям, при которых они были сняты, а именно: оговаривается тип включения, режим шаг/полушаг, тип драйвера, номинальный ток, напряжение питания драйвера. При изменении

рабочих параметров данные о частотной характеристике двигателя на приводимых графиках будут неточными.

• 57HS13

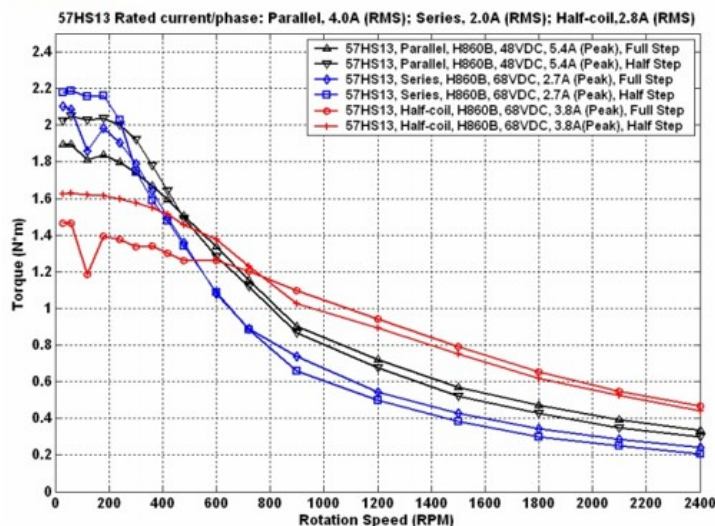


Рис. 16 – Пример приводимых в справочных данных зависимостей $M(f)$ для шагового двигателя модели 57HS13

Чтобы уменьшить влияние на скоростные параметры двигателя ограничений, связанных с конечной скоростью нарастания тока в индуктивности обмоток двигателя при переключениях обмоток, часто применяется повышенное напряжение на обмотках. При этом для ограничения тока на требуемом уровне применяют либо балластные резисторы, что приводит к большим непроизводительным потерям энергии, либо применяют драйверы с режимом ШИМ. Мы не будем рассматривать эффекты, связанные с ограничением скорости нарастания и спада тока в обмотках, предполагая, что при правильном выборе режима работы двигателя и драйвера влияние этих эффектов будет незначительным.

При проведении оценки характеристик приводов с шаговыми двигателями, применяя формулы (4 – 8), мы получим оценку стартовых частот двигателей, используя значение статического удерживающего момента (то есть на нулевой частоте), так как ожидаемые значения стартовых частот лежат в диапазоне 1 – 4 кГц, и для предполагаемых к использованию двигателей падение момента на этих частотах не очень значительно.

Таким образом, имея данные о структуре и механических характеристиках системы, можно оценить реализуемость желаемых параметров приводов, сделать оптимальный выбор двигателя для обеспечения силовых и динамических характеристик привода, оптимизировать кинематическую схему системы для улучшения её динамических характеристик.

Оценим динамические характеристики привода линейного перемещения по Y, выполненного по кинематической схеме ШВП. Нагрузкой привода является конструктивная часть системы позиционирования, показанная на рисунке 14 красной пунктирной линией. Эта часть включает приводы MOZ-300-200, MOR-300-A, MOG-160-15, элементы конструкции, детектор. Общая масса нагрузки ≈ 75 кг.

Данные серводвигателя и привода:

- радиус винта $r = 20$ мм,
- шаг винта $p_Y = 20$ мм,
- диапазон перемещения каретки $l_Y = 928$ мм,
- длина винта 1154 мм,
- номинальная скорость вращения двигателя $\omega_{MY} = 3000$ об/мин,
- номинальный момент удержания 4 Н·м при токе в обмотке 5 А,
- пиковый момент 12 Н·м,
- момент инерции ротора $0.54 \cdot 10^{-4}$ кг·м².

Найдём момент инерции винта ($1.43 \cdot 10^{-4}$ кг·м²), приведём сумму моментов инерции винта, муфты и ротора двигателя (J_{RMS}) в эквивалентную инертную массу на каретке:

$$m_R = J_{RMS} \cdot \left(\frac{2\pi}{p} \right),$$

где $m_R = 19.4$ кг, общая масса на каретке $m_T = 94.4$ кг.

Найти развиваемое двигателем ускорение каретки с нагрузкой можно, например, посчитав осевое усилие на каретке, то есть силу, толкающую каретку при приложении вращающего момента к винту:

$$F = M \cdot \left(\frac{2\pi}{p} \right)$$

Осевое усилие: $F=1257$ Н, после пересчёта трения в винте ШВП (6 Н) к оси двигателя и вычета трения в направляющих (около 3 Н) осевое усилие $F_A=1233$ Н.

Достижимое ускорение нагрузки: $a_y = \frac{F_A}{m_T}$ составляет 13 м/с². Результаты приведены в приложении А, таблица 2.

Особенностью расчёта привода по Z координате является то, что к платформе привода приложена постоянная сила $m \cdot g$, равная весу расположенных на платформе объектов (обведены зеленым пунктиром на рисунке 14). Общая масса нагрузки на платформе, включая подъёмную часть привода, составляет 59 кг, постоянно действующая на платформу сила $F_{mg}=588$ Н.

Коэффициент передачи червячного редуктора 1:60, примем КПД червячного редуктора $\eta_p=0.7$, а момент на винте, развиваемый двигателем с учётом редуктора:

$$M_s = K_{pz} \cdot \eta_p \cdot M,$$

где M - вращающий момент двигателя.

Диаметр винта 16 мм, шаг винта 5 мм. Принимая КПД ШВП $\eta_s=0.95$ момент нагрузки на винте, создаваемый силой тяжести:

$$M_{mg} = F_{mg} \cdot \frac{p}{2\pi \cdot \eta_s}$$

Тогда $M_{mg}=0.5$ Н·м. Сумма момента инерции винта и приведённой к винту инертной массы, нагружающей платформу, составляет общий момент инерции $J_T=6.26 \cdot 10^{-4}$ кг·м², и приводя его к валу двигателя $J_{TD} = J_T \cdot (K_{pz})^2$, получаем $J_{TD}=6.26 \cdot 10^{-7}$ кг·м².

Результаты расчёта стартовых частот по (5), (6) для нескольких типов двигателей приведены в приложении А, таблица 3.

Динамические параметры приводов вращения MOR-300 и MOG-160-15 рассчитываются аналогичным образом, принимая во внимание тот факт, что

при приведении к валу двигателя момент инерции нагрузки изменяется пропорционально квадрату коэффициента редукции, а вращательный момент и угловая скорость изменяются пропорционально коэффициенту редукции.

Отсутствующие данные о собственных моментах инерции MOR-300 и MOG-160-15 были заменены на рассчитанные моменты инерции для простых тел (параллелепипед, цилиндр, описанных вокруг модели привода) с заведомо большим параметром момента инерции. Результаты моделирования приведены в приложении А, таблицы 4,5.

В результате оценочного расчёта динамических характеристик системы позиционирования детектора были получены: максимальные значения ускорений по Y координате, стартовые значения частот применённых шаговых двигателей в приводах Z , φ , ψ , скорости перемещения линейного привода по Z и угловые скорости приводов по φ , ψ в режиме работы шаговых двигателей без разгона. При моделировании динамических характеристик приводов, использующих большие коэффициенты редукции, выяснилось, что определяющее значение для выбора двигателя имеет нагрузка, действующая непосредственно на оси двигателя (до редуктора), выбор двигателя следует осуществлять по максимальному соотношению вращающего момента двигателя за вычетом приведённого момента трения к сумме момента инерции ротора двигателя и первого звена редуктора. В связи с тем, что дискретности угловых и линейных перемещений применённых приводов очень малы (из-за больших коэффициентов редукции в приводах) по сравнению с требуемыми точностными характеристиками системы позиционирования детектора, для улучшения скоростных характеристик приводов на шаговых двигателях целесообразно использовать разгон двигателей, а также могут быть применены методы управления шаговыми двигателями с использованием обратной связи по положению [21, 24].

Экспериментальная часть

В рамках данной работы для оценки функциональности и точности разработанного эмулятора был проведён эксперимент при заданных угловых отклонениях систем координат и координате, которая является целевой пространственной позицией детектора. Для проведения данного эксперимента необходимые параметры были выбраны таким образом, чтобы максимально приблизить эксперимент к реальной ситуации. В частности, были выбраны следующие угловые рассогласования между относительной системой координат, эмулирующей установку, и абсолютной, используемой в алгоритмах системы управления:

- отклонение по оси Y: 5.0° ,
- отклонение по оси Z: 3.0° .

Начальное положение детектора в абсолютной системе координат было задано вектором (4.0, 5.0, 6.0), начальная ориентация детектора была принята нулевой, а начальные смещения приводов, определяемые четырёхкомпонентным вектором, были заданы следующие: (10.0, 12.0, 0.0, 0.0). Целевая точка, в которую требовалось осуществить перемещение детектора, имела координаты (2.87, 63.91, 28.47), конечная ориентация была задана вектором (0., -4.8, -2.2). Выбор указанных координат, не считая ориентации детектора, осуществлялся случайно.

В результате тестирования детектор оказался в заданной точке с точностью 0.01 мм, а также конечная ориентация детектора совпала с заданной с точностью 0.1° . Визуализацию траекторий движения и графики изменения параметров можно посмотреть в приложении Б на рисунках 17-23.

Результаты

- Разработана математическая модель системы позиционирования детектора для разработки программы-эмулятора и алгоритмов управления перемещением детектора;
- Разработана физическая модель системы позиционирования детектора синхротронного излучения для оценки динамических характеристик системы;
- Реализован алгоритм позиционирования детектора на основе численного метода нахождения относительных перемещений для достижения требуемого пространственного и углового положения в абсолютной системе координат, представленной системой технического зрения;
- Реализован алгоритм позиционирования детектора по величине сигнала и ширине границы непрозрачного края изображения;
- Написана программа-эмулятор движения детектора для проверки работы системы позиционирования.

Дальнейшие планы:

- Применение и тестирование алгоритма на реальной установке;
- Подключение системы технического зрения и отладка обмена данными с ней;
- Улучшение алгоритма установки детектора в рабочее положение, а именно использование выявленных допустимых параметров движения, не приводящих к повышенным нагрузкам на механизм.

Список литературы

1. Жуланов В.В. Регистрирующая аппаратура для исследования детонационных и ударно-волновых процессов с использованием синхротронного излучения. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Новосибирск, 2011.
2. Аульченко В.М., Жуланов В.В., Кулипанов Г.Н. и др. Исследование быстропротекающих процессов рентгенодифракционными методами в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения // УФН. 2018. 188, № 6, с. 577–594.
3. Shekhtman L.I. et al. Upgrade of the detector for imaging of explosions./ Physics Procedia 84 (2016), с. 189 – 196.
4. Аульченко В.М., Глушак А.А., Жуланов В.В., Журавлев А.Н., Киселев В.А., Кудрявцев В.Н., Пиминов П.А., Титов В.М., Шехтман Л.И. Микрополосковый кремниевый детектор для изучения быстропротекающих процессов на пучке синхротронного излучения. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023, № 12.
5. Abiven Y.-M., Bucaille T., Chavas L., Elkaim E., Gourhant P., Liatimi Y., Medjoubi K., Pierre-Joseph Zephir S., Pinty V., Somogyi A., Thiam F., ROBOTIZING SOLEIL BEAMLINES TO IMPROVE EXPERIMENTS AUTOMATION, Synchrotron SOLEIL, Paris, France S. Bouvel, EFOR, Levallois Perret, France, B. Pilliaud, Mediane Systeme, Le Pecq, France. ICALEPCS 2019, complete volume of paper, p.183.
6. Серводвигатели PMSM серия ST. Руководство по эксплуатации. [URL:https://purelogic.ru/docs/elektroprivod/Servodvigateli_PMSM_seriya ST user manual.pdf?ysclid=mb0trm8sed519688201](https://purelogic.ru/docs/elektroprivod/Servodvigateli_PMSM_seriya_ST_user_manual.pdf?ysclid=mb0trm8sed519688201) (дата обращения: 28.01.2025).
7. Модули линейного перемещения серии КТ. Руководство по эксплуатации. URL:

https://purelogic.ru/docs/mekhatronika/Moduli_lineynogo_peremescheniya_K_T_manual_ru.pdf?ysclid=mb0u5at5ge44341536 (дата обращения: 28.01.2025).

8. Optic focus. Motorized Positioning Stages. URL: <https://optics-focus.com/motorized-positioning-stages-c-66.html?zenid=domae7bdgdrab55c8biske0ki5> (дата обращения: 21.12.2024).
9. OpenCV documentation, URL: https://gregorkovalcik.github.io/opencv_contrib/tutorial_aruco_detection.html (дата обращения: 20.02.2025).
10. Thresholding-Based Image Segmentation, URL: <https://www.geeksforgeeks.org/thresholding-based-image-segmentation/> (дата обращения: 05.03.2025).
11. Пономарев В.В., Федеральное агентство по образованию Озерский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО «Московский инженерно-физический институт (государственный университет)», Машинная графика, Озерск, 2006.
12. Bryan S. Morse, Brigham Young University, lecture 4: notes of thresholding, 1998-2000.
13. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация = Practical optimization. — М.: Мир, 1985. — 509 с.
14. Roger A. Horn, Topics in Matrix Analysis, с. 114-117 (Cambridge University Press 1994).
15. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. — М.: Наука.
16. NumPy documentation, URL: <https://numpy.org/doc/stable/> (дата обращения: 18.01.2024).
17. Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А. Методы управления робототехническими приложениями. Учебное пособие. С-Пб.: Университет ИТМО, 2016. – 108 с.

18. SciPy documentation, [URL: https://docs.scipy.org/doc/](https://docs.scipy.org/doc/) (дата обращения: 18.01.2025).
19. Электронный ресурс «Википедия», https://ru.wikipedia.org/wiki/Гессиан_функции (дата обращения 05.11.2024).
20. Электронный ресурс «Википедия», https://en.wikipedia.org/wiki/Wolfe_conditions (дата обращения 13.11.2024).
21. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.: ил.
22. Комплектующие для шаговых приводов. Каталог продукции Leadshine. URL:https://purelogic.ru/docs/elektronika/Stepper%20Product%20Catalog_2020_compressed.pdf?ysclid=mb0uiirlaf191671104 (дата обращения: 21.12.2024).
23. CS-M Series Closed Loop Stepper Motors. [URL: https://atbautomation.eu/uploads/CS-M_closed_loop_stappenmotoren.pdf](https://atbautomation.eu/uploads/CS-M_closed_loop_stappenmotoren.pdf) (дата обращения: 18.12.2024).
24. Климчик А.С., Гомолицкий Р.И., Фурман Ф.В., Сёмкин К.И. Разработка управляющих программ промышленных роботов. Курс лекций. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, 2008.

Приложение А

Таблица 1. Сравнение численных методов оптимизации модуля optimize библиотеки SciPy

Метод	Категория	Градиент	Ограничения	Скорость	Масштабируемость	Устойчивость
Nelder-Mead	Безградиентный (симплекс)	Нет	Нет	Средняя	Низкая	Высокая
L-BFGS-B	Градиентный (ограниченный)	Да	Да (боковые)	Высокая	Средняя/Высокая	Средняя
COBYLA	С ограничениями	Нет	Да (нелинейные)	Средняя	Низкая/Средняя	Средняя
Trust-constr	Метод доверительных областей	Да	Да (общие)	Средняя	Любая	Высокая

Таблица 2. Динамические параметры привода Y – координаты

Осевое усилие, Н	Момент инерции винта, 10^{-4} кг·м ²	Момент инерции ротора, 10^{-5} кг·м ²	Крутящий момент, Н·м	Общая инертная масса, приведенная к каретке, кг	Максимальное ускорение каретки, м/с ²
1233	1.42	5.4	4	94.4	13.06

Примечание: привод КТ10020С-1080, серводвигатель 110ST-04030, мощность – 1.2 кВт, крутящий момент – 4 Н·м. Инертная масса на каретке – 75 кг. Диаметр винта ШВП – 20 мм, шаг винта – 20 мм. Результаты расчета при КПД ШВП 95%.

Двигатель	Крутящий момент	Момент инерции ротора J_{rot} ,	Момент инерции	Стартовая частота в режиме	Стартовая скорость
-----------	-----------------	-----------------------------------	----------------	----------------------------	--------------------

	M, Н·м	10^{-5} кг·м ²	муфты J_s , 10^{-5} кг·м ²	полушага f , Гц	v , мм/с
NEMA23 FL57STH41- 2804	1.2	3	0.1	2020	0.42
NEMA23 CS-M22323	2.3	4.8	0.26	2300	0.49
NEMA17 42CM-08	0.8	1.1	0.09	2513	0.52
Примечание: передаточное число – 1:60, диаметр винта – 16 мм, шаг винта – 5 мм. Масса нагрузки на платформу ≈ 59 кг. Момент инерции нагрузки, пересчитанный к валу двигателя – $1.74 \cdot 10^{-7}$ кг·м ² . Момент нагрузки на винте ШВП, пересчитанный к валу двигателя 0.008 Н·м. Момент трения, приведенный к валу двигателя 0.2 Н·м.					

Таблица 3. Результаты расчета привода Z для разных типов двигателей

Таблица 4. Результаты расчета привода поворотной платформы MOR- 300
для разных типов двигателей

Двигатель	Крутящий момент М, Н·м	Момент инерции ротора J_{rot} , 10^{-5} кг·м ²	Момент инерции муфты J_s , 10^{-5} кг·м ²	Стартовая частота в режиме полушага f , Гц	Стартовая скорость вращения ω , °/с
NEMA23 FL57STH41- 2804	1.2	3	0.1	2180	3.4
NEMA23 CS-M22323	2.3	4.8	0.26	2360	3.7
NEMA17 42CM-08	0.8	1.1	0.09	3150	4.92
Примечание: передаточное число 1:576. Момент инерции нагрузки, пересчитанный к валу двигателя – $0.2 \cdot 10^{-5}$ кг·м ² .					

Таблица 5. Результаты расчета привода наклона MOG 160-15 для разных типов двигателей

Двигатель	Крутящий момент	Момент инерции	Момент инерции	Стартовая частота в	Стартовая скорость
-----------	--------------------	-------------------	-------------------	------------------------	-----------------------

	М, Н·м	ротор $J_{rot},$ $10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	муфты $J_s,$ $10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	режиме полушага f , Гц	вращения ω , °/с
NEMA23 FL57STH41 -2804	1.2	3	0.1	2173	4.89
NEMA23 CS- M22323	2.3	4.8	0.26	2374	5.34
NEMA17 42CM-08	0.8	1.1	0.09	2772	6.24
NEMA17 42CM-06	0.6	0.72	0.09	2842	6.4
Примечание: передаточное число 1:400, вынос оси качания 139 мм. Момент инерции нагрузки, пересчитанный к валу двигателя $1.36 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.					

Приложение Б

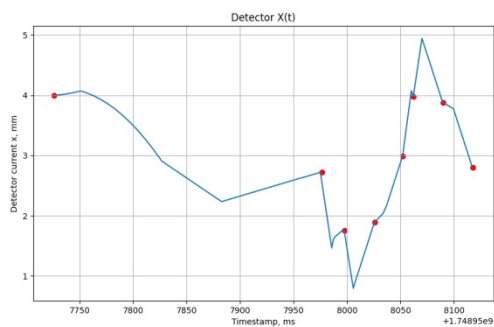


Рис. 17 – График зависимости положения детектора по оси X от времени (синим), команда на смещение от времени (красным)

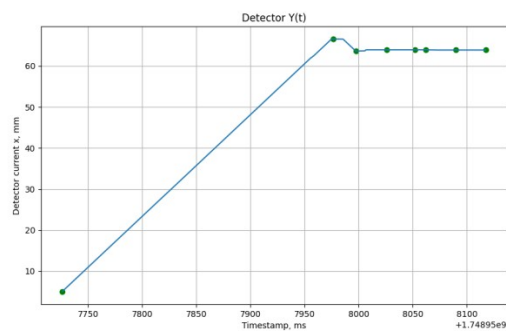


Рис. 18 – График зависимости положения детектора по оси Y от времени (синим), команда на смещение от времени (зелёным)

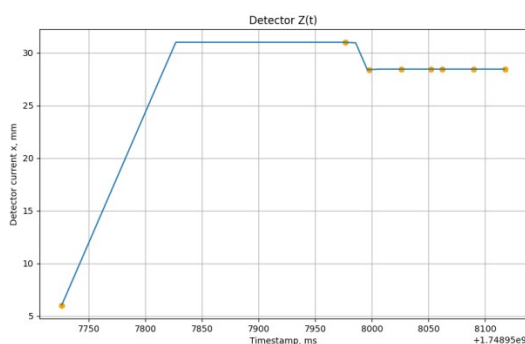


Рис. 19 – График зависимости положения детектора по оси Z от времени (синим), команда на смещение от времени (жёлтым)

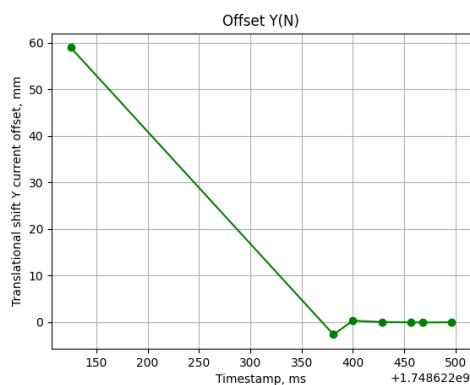


Рис. 20 – График зависимости смещения поступательной подвижки Y от времени

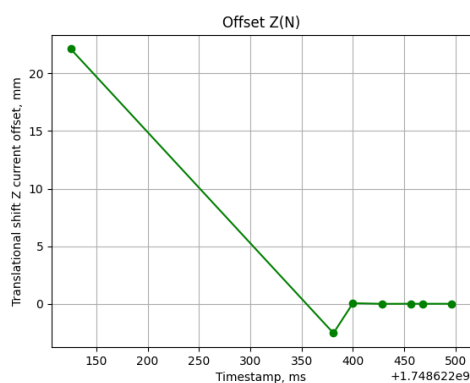


Рис. 21 – График зависимости смещения поступательной подвижки Z от времени

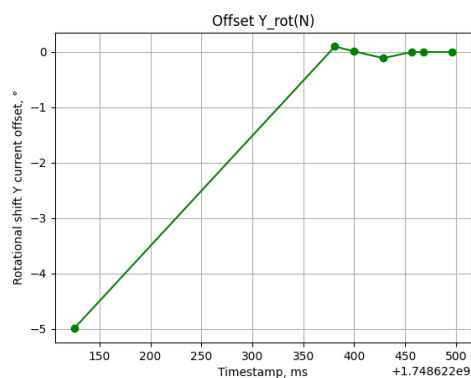


Рис. 22 – График зависимости смещения вращательной подвижки Y от времени

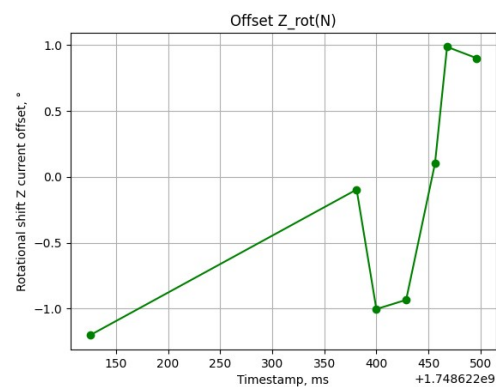


Рис. 23 – График зависимости
смещения вращательной подвижки Z от
времени