

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой №13

доцент, к.т.н.

должность, уч. степень, звание

 03.04.23  
подпись дата

Н.А. Овчинникова

инициалы, фамилия

ЗАДАНИЕ НА ДИПЛОМНУЮ РАБОТУ

студенту группы

1832

номер

Басаргиной Валентине Сергеевне

(фамилия, имя, отчество)

на тему

Исследование пространственной траектории беспилотного  
летательного аппарата

утвержденную приказом ГУАП от

03.04.2023

№ 11-370/23

1 Основные исходные данные

Математическая модель траектории полета БПЛА;

Ограничения на переменные состояния БПЛА

2 Перечень и примерное содержание обязательных разделов дипломной работы

Краткие сведения о БПЛА и его математическая модель;

Построение траектории БПЛА самолетного типа;

Реализация программного комплекса по нахождению оптимальной траектории;

Безопасность жизнедеятельности;

Оценка экономической эффективности

3 Задание на научно-библиографический поиск

«Построение траектории летательных аппаратов с немонотонным изменением энергии»

Канатников А.Н.;

«Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами» Моисеев В.С.;

«Определение аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата  
самолетного типа аналитическими методами» Исмаилов К.К.

4 Задачи по разделу экономики и организации производства

Определение экономической эффективности программного продукта

5 Задачи по разделу охраны труда и окружающей среды

Разработка мероприятий по организации безопасности и соблюдению  
санитарно-гигиенических условий труда на рабочем месте пользователя ПК

6 Перечень обязательных чертежей и плакатов

Подготовить презентацию, слайды которой включают следующую информацию:

актуальность, цели, задачи;

математическая модель движения БПЛА;

интерфейс приложения;

заключение

Срок сдачи работы « 29 » мая 2023

Руководитель

профессор, д.т.н., профессор

должность, уч. степень, звание

подпись, дата

А.П. Ковалев

инициалы, фамилия

Консультанты

доцент, к.т.н.

должность, уч. степень, звание

подпись, дата

Р.Н. Целмс

инициалы, фамилия

старший преподаватель

должность, уч. степень, звание

подпись, дата

О.П. Покшиванова

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению

студент группы № 1832

подпись, дата

В.С. Басаргина

инициалы, фамилия

## РЕФЕРАТ

Дипломная работа содержит 96 с., 42 рис., 11 табл., 11 источников, 3 приложения.

ОПТИМАЛЬНАЯ ТРАЕКТОРИЯ ПОЛЕТА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ БПЛА, ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА, ПРИЛОЖЕНИЕ В APP DESINGER.

Актуальность: российская промышленность БПЛА получила большой толчок в своем развитии относительно недавно, поэтому это хорошая почва для создания различных программных комплексов. Использовать БПЛА планируется в разных областях, а значит количество пользователей будет возрастать, для удобства работы с программными комплексами для БПЛА необходим простой интуитивно понятный интерфейс, при чем который бы позволял проводить сложные вычисления и даже строить графики.

Цель работы: создание простого в использовании приложения, которое определяет оптимальную по времени траекторию полета.

Задачи:

- описание математической модели движения БПЛА;
- поиск оптимальной траектории полета;
- создание приложения с современным удобным интерфейсом;
- тестирование программного комплекса.

Объект исследования: траектория полета БПЛА.

Предмет исследования: оптимальная траектория полета БПЛА и реализация ее поиска с помощью программного комплекса.

Для построения траектории движения БПЛА рассматривается задача терминального управления. А непосредственно для разработки интерактивной среды и программирования его поведения предлагается использование App Designer, так называемого редактора приложений в MATLAB.

Разработанное приложение можно подстраивать под конкретный беспилотник с его особенностями по ограничениям переменных состояний,

для использования уже готового программного комплекса не обязательно иметь установленный MATLAB, т.к. пользователю будет достаточно web-версии для работы с ним, если же приложение требует изменений работы приложения или модернизации, то необходим MATLAB. Соответственно приложение может быть подстроено под определенного пользователя, а ему в свою очередь не потребуются знания программирования и опыт работы с программной средой MATLAB в том числе и App Designer, он будет работать только с интуитивно понятным интерфейсом.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	7
ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 Краткие сведения о БПЛА и его математическая модель.....	9
1.1 Практическая ценность БПЛА и состав бортового оборудования .....	9
1.2 Классификация аэродинамических схем БПЛА .....	14
1.3 Основные положения прикладной теории управления беспилотными летательными аппаратами .....	20
2 Построение траектории БПЛА самолетного типа .....	30
2.1 Модель движения БПЛА.....	30
2.2 Начальный и конечный переходные маневры .....	38
2.3 Поиск наиболее благоприятной траектории .....	43
3 Реализация программного комплекса по нахождению оптимальной траектории .....	48
3.1 Разработка интерфейса и функций в App Designer .....	48
3.2 Тестирование работы программного комплекса в MATLAB .....	53
4 Безопасность жизнедеятельности.....	66
5 Оценка экономической эффективности .....	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	88
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	90
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	92
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	95
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	96

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей дипломной работе применяют следующие сокращения и обозначения:

БАК – беспилотный авиационный комплекс

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

ВПП – взлетно-посадочная полоса

ЛА – летательный аппарат

МНПУ – мобильные пункты наземного управления

МПУ – мобильная пусковая установка

НПУ – наземный пункт управления

ПЗ – полетное задание

ПК – персональный компьютер

ТЗ – техническое задание

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ЭМИ – электромагнитное излучение

ЭМП – электромагнитное поле

NPV – net present value (чистый дисконтированный доход)

## ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в легких, недорогих летательных аппаратах с высочайшей маневренностью и возможностью решать разнообразные задачи стала толчком к расцвету беспилотной авиации во всем мире. Но на данный момент большинство существующих БПЛА по-прежнему пилотируется вручную через радиоканалы, что влечет за собой трудности, связанные с обучением и ограничениями действия в погодных условиях.

Управление БПЛА – это сложная и ответственная задача, требующая отличной подготовки профессионалов. Затруднения в управлении БПЛА часто возникают из-за человеческих ошибок и механических повреждений, что делает этот процесс еще более сложным, чем пилотирование самолета.

Разработка беспилотных летательных аппаратов – это молодая отрасль, которая стремительно набирает обороты. Новые горизонты открываются в самых разных областях, где ранее человеческие возможности были ограничены. Ведь беспилотные летательные системы прекрасно подойдут для исследования наших огромных территорий, а также для скоростной и надёжной доставки товаров, медикаментов и почтовых услуг. Это лишь малая часть того, что нам представляется уже в ближайшее время.

В перспективе беспилотные летательные аппараты найдут широкое применение в чрезвычайных ситуациях и будут держать под жёстким контролем промышленные объекты, трубопроводные системы, линии электропередачи и другую критически важную инфраструктуру. Несомненно, они смогут эффективно управлять и контролировать состояние лесов и природных ресурсов в целом. Направление, в которое развиваются беспилотные летательные аппараты, – прогрессивное и технологически продвинутое, и мы можем только представить, какие возможности они предоставят нам в будущем.

## **1 Краткие сведения о БПЛА и его математическая модель**

### **1.1 Практическая ценность БПЛА и состав бортового оборудования**

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) — это летательный аппарат, пилотируемый дистанционно или выполняющий полёт автономно, без помощи пилота.

Самолеты, которые пилотируются, требуют более высоких расходов на производство и обслуживание, чем беспилотники. Это объясняется тем, что обычный самолет должен иметь систему защиты и жизнеобеспечения для пилотов, в то время как беспилотный летательный аппарат не нуждается в этом. Также, обучение и подготовка пилотов требуют гораздо больше времени, чем обучение оператора беспилотного летательного аппарата.

Беспилотные летательные аппараты – настоящий прорыв в авиационной индустрии. В отличие от обычных самолетов, которые потребляют огромные объемы топлива, БПЛА используют гораздо меньше топлива благодаря своей структуре и размерам. Кроме того, они могут работать на альтернативных источниках энергии, что делает их еще более экологически безопасными.

В то же время, посадка пилотируемого самолета требует огромной посадочной площади, что создает проблемы для аэропортов и городов. Беспилотники, наоборот, могут спокойно приземляться на небольших полосах в любом удобном месте. Такие модели, как микро-БПЛА, могут приземляться на крыше дома или на балконе, благодаря чему они становятся все более популярными в городах.

Одно из ключевых достоинств таких летательных аппаратов – высокая скорость разворачивания, что позволяет максимально эффективно использовать время на плановых полетах. Подготовка модели к эксплуатации занимает не более полутора часов – и это очень удобно.

Так же, преимущества БПЛА в том, что они могут обслуживаться одним или двумя операторами. Это позволяет существенно упростить работу и



снизить затраты. Сложные операции становятся максимально простыми и максимально используемыми.

Кроме того, БПЛА отличаются высокой мобильностью и легкостью в применении подвижных и мобильных станций управления, что является очень удобно в экстремальных условиях.

Необходимо отметить, что современные видео системы, которые используются при управлении БПЛА, позволяют передавать информацию в режиме реального времени, что делает такие системы не только удобными, но и технологичными. Примененные технологии позволяют добиться дальности применения до 150 км, что также является существенным достоинством.

БПЛА могут работать на практически любых стартовых площадках и не требуют глубокой адаптации. Они также обладают минимальной аудиовизуальной заметностью, что позволяет проводить скрытое наблюдение.

Вдобавок ко всему вышесказанному, можно добавиться еще одно достоинство БПЛА – это их экономическая выгода. Эти летательные аппараты отличаются высокими экономическими показателями, что делает их очень привлекательными для применения в различных сферах деятельности.

Благодаря возможностям, которые предоставляют БПЛА, их можно считать настоящей находкой для различных сфер деятельности. Вот примеры, где они применяются:

- архитектура и градостроительство: для формирования 2D и 3D карт, для создания модели местности;
- аэросъемка;
- обнаружение лесных пожаров;
- геологоразведка: для создания 3-х мерных моделей рельефа;
- горная добыча;
- видеофиксация дорожных нарушений: может обнаружить обгон с нарушением или переезд двойной сплошной, фиксация использования мобильного телефона за рулем;
- мониторинг линий электропередач.

Одно из ключевых назначений беспилотных летательных аппаратов в гражданском воздушном пространстве – мониторинг территории. Облет зон включает неограниченные авиаработы, специализированные и проверочные полеты.

Стандартные авиаработы, как правило, связаны с регулярными полетами по известному маршруту (патрулированию). Они включают в себя наблюдение и коммуникации и, согласно прогнозам, станут большой составляющей полетов БПЛА до 2030 года. Наблюдение может быть связано с географией, такой как линия берега или граница, и другими элементами, такими как высотные здания, леса, дороги и трубопроводы. Патрулирование проводится в нижнем пространстве (до 1000 метров над поверхностью), так и верхнем воздушном пространстве (свыше 4000 метров). Оно может выполняться в зависимости от состава бортового оборудования как с использованием правил полетов по приборам, так и визуальных правил полета [1].

Специальные полеты БПЛА могут использоваться для слежения за наземным транспортом. Операторы БПЛА, управляя полетом, не могут предсказать детальный маршрут полета, но могут указать зону полета.

В сложной динамичной структуре воздушного единого пространства организовать, осуществлять и управлять полетами беспилотных летательных аппаратов по жестким программно-временным графикам практически невозможно. Также для БПЛА требуются дополнительные элементы системы обеспечения. К ним относятся сам беспилотный аппарат, рабочее место оператора, программное обеспечение, линии передачи данных и элементы, необходимые для выполнения целей полета. Управление БПЛА должно следовать тем же правилам, что и другие воздушные суда.

В настоящее время большинство существующих БПЛА пилотируется вручную с помощью пультов дистанционного управления, работающих по радиоканалам. При этом управление БПЛА является задачей для хорошо подготовленного профессионала.

Система автоматического управления БПЛА открывает бескрайние возможности: автономные полеты по заданным траекториям на заданной высоте и со стабильной ориентацией углов, в любых погодных условиях, далеко от базы и вне контакта с наземными станциями. А главное - все это возможно без высоких эксплуатационных издержек и без нагрузки на персонал.

Чтобы достичь таких высоких показателей качества систем БПЛА, оснащенных полноценным автопилотом, нужен эффективный бортовой комплекс. В его состав входит надежная система навигации и управления, которая обеспечивает точный контроль и управление беспилотным самолетом в любой ситуации:

- приемник спутниковой навигации, обеспечивающий прием навигационной информации;
- систему инерциальных датчиков, обеспечивающую определение ориентации и параметров движения БПЛА;
- систему воздушных датчиков, обеспечивающую измерение высоты и скорости;
- различные виды антенн.

Блок датчиков с интегрированной спутниковой навигационной системой предназначен для получения информации о параметрах, характеризующих поступательное и вращательное движение центра масс при полете БПЛА. Поступательное движение характеризуется координатами и их производными во времени, вращательное - углами и их производными во времени. В блоке датчиков реализуется комбинированный метод навигации, основанный на рациональном взаимодействии бесплатформенной инерциальной и спутниковой систем навигации.

Система автоматического управления состоит из:

- процессорной платы;
- платы управления сервоприводами;
- платы управления оборудованием полезной нагрузки;

- платы контроллера CAN-канала;
- регистратора для накопления и хранения полетной информации.

Бортовая система навигации и управления должна обеспечивать:

- полет по заданному маршруту (задание маршрута производится с указанием координат и высоты поворотных пунктов маршрута);
- возврат в точку старта при потере управления;
- облет указанной точки;
- автосопровождение выбранной цели;
- стабилизацию углов ориентации БПЛА;
- поддержание заданных высот и скорости полета;
- сбор и передачу телеметрической информации о параметрах полета и работе целевого оборудования;
- программное управление устройствами целевого оборудования.

Функциональность бортовой системы связи подразумевает превосходную работу на одобренном радиочастотном диапазоне, легкую передачу данных, как на наземную станцию, так и обратно на борт. На землю передаются данные стандартной телеметрии, качественные потоковые фото- и видеоизображения. А с борта на землю поступают команды для управления БПЛА и тонко настроенной целевой аппаратурой. [2]

Командный радиоканал предназначен для дистанционного управления БПЛА и обеспечивает:

- связь БПЛА с НПУ;
- прием с НПУ команд управления устройствами БПЛА и полезной нагрузки;
- передачу на НПУ телеметрической информации;
- обмен по мультиплексному CAN-каналу;

Командный радиоканал состоит из

- контроллера CAN-канала;
- радиомодема;
- приемопередающей антенны.

Информационный радиоканал предназначен для передачи на НПУ видеоизображения. Информационный радиоканал состоит из радиомодема и дипольной антенны.

## **1.2 Классификация аэродинамических схем БПЛА**

Аэродинамические схемы БПЛА можно разделить на следующие виды: самолетного типа, вертолетного типа, мультикоптерного типа, Tail-sister и конвертоплан. Каждая аэродинамическая схема имеет свои преимущества и недостатки.

Беспилотные летательные аппараты с жестким крылом, также известные как БПЛА самолетного типа, осуществляют горизонтальный полет за счет воздушного напора, создаваемого неподвижным крылом. Благодаря этому механизму высокое качество полета обеспечивается на протяжении продолжительного времени, достигая высоких скоростей и максимальных высот. Хотя такие аппараты требуют специализированных взлетно-посадочных полос, некоторые из них все же могут совершать посадки на площадках с плохой подготовкой. БПЛА самолетного типа представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – БПЛА самолетного типа

Выполнение посадки БПЛА может происходить разными способами: на обычной ВПП, с помощью парашюта в зафиксированном районе, или с помощью специальных уловителей, таких как тросы, сети или растяжки. Уникальные характеристики данных аппаратов, а также сложность процесса взлета и посадки, указывают на разнообразие областей, где могут быть применены.

Самолетные БПЛА чаще всего используются в картографии, аэрофотосъемке, поисково-спасательных миссиях, а также в научных исследованиях. Их также могут использовать для ношения разведывательного оборудования, и крайне редко - для экстренной доставки маленьких грузов.

В БПЛА мультикоптерного типа применяются более двух фиксированных винтов с изменением частоты их вращения для управления полетом. Реактивные моменты уравниваются за счет противовращения несущих винтов. БПЛА мультикоптерного типа представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – БПЛА мультикоптерного типа

Мультикоптеры имеют хорошую маневренность в воздухе. Благодаря своей потрясающей ей и возможности зависания, эти беспилотники способны совершать вертикальные взлеты и посадки без особых усилий или взлетно-посадочных полос. Даже несколько качающаяся платформа не станет преградой для мультикоптера, ведь он с легкостью сможет на нее сесть, например, на судне во время шторма.

Кроме того, мультикоптеры не боятся замкнутых пространств и плотной городской застройки. Их маневренность – это их главная особенность, которой они могут воспользоваться, чтобы избежать крупных препятствий.

Мультикоптеры имеют широкие возможности в доставке маленьких посылок и другой переписки. Мультикоптеры – наиболее перспективные и удобные решения для адресной доставки.

К категории БПЛА вертолетного типа относят БПЛА, использующие одновинтовую схему вертолета Сикорского с хвостовым рулевым винтом. Пример такого БПЛА изображен на рисунке 3.





Рисунок 3 – Одновинтовой БПЛА вертолетного типа

Подъёмная сила у аппаратов этого типа создается за счет вращающихся лопастей несущего винта, поступательное движение обеспечивается механизмом перекоса.

Реактивный крутящий момент у таких вертолетов уравнивается рулевым винтом, расположенным на хвостовой балке, на некотором расстоянии от оси несущего винта, а изменяя тягу рулевого винта, можно управлять поворотом вертолета относительно вертикальной оси.

Большинство современных вертолетов выполнено по одновинтовой схеме. Достоинством такой схемы является простота конструкции и системы управления.

К недостаткам следует отнести большие габариты за счет хвостовой балки и потери мощности на привод рулевого винта (до 10% от мощности двигателя), уязвимость и опасность повреждения рулевого винта при полете у земли.

Для увеличения объемов грузового отсека и/или подвеса перспективно использование продольной двухвинтовой схемы вертолетов, подобная конструкция изображена на рисунке 4. У таких вертолетов реактивный момент



компенсируется за счет противоположного направления вращения винтов, которые расположены один за другим вдоль фюзеляжа.



Рисунок 4 – БПЛА вертолетного типа с использованием продольной двухвинтовой схемы

Несущие винты располагаются с перекрытием, задний винт имеет превышение, чтобы уменьшить вредное влияние на него потока от переднего винта. Однако недостатками являются сложная система трансмиссии, необходимость синхронизации вращения несущих винтов, большие индуктивные потери при горизонтальном полете и переменные нагрузки на несущих винтах, а также сложная посадка в режиме авторотации.

БПЛА схемы Tail-sitter, крылатый мультикоптер и конвертоплан, несмотря на конструктивные отличия, являются попытками объединить преимущества энергоэффективного горизонтального полета крылатого БПЛА с возможностью управляемых вертикального взлета и посадки.

Современный уровень развития микроэлектроники позволяет создать компактную и сравнительно недорогую систему стабилизации при посадке, а также на этапе перехода от горизонтального полета к вертикальному снижению. Наиболее перспективные разработки используют винтокольцевые двигатели, энергетически более выгодные на БПЛА подобных размеров.

Tailsitter с винтокольцевым движителем показан на рисунке 5. Аэродинамическая схема такого БПЛА приближена к самолетной. Это позволяет развивать большие, в сравнении с мультикоптерами и вертолетами, скорости.



Рисунок 5 – БПЛА схемы Tail-sitter

Конвертопланом называют БПЛА с поворотными винтами, которые на взлёте и при посадке работают как подъёмные, а в горизонтальном полёте – как тянущие. Конвертоплан представлен на рисунке 6. В горизонтальном полете подъёмная сила обеспечивается крылом самолётного типа). Таким

образом, этот аппарат ведет себя как вертолет при взлете и посадке, но как самолет в горизонтальном полете. [3]



Рисунок 6 – БПЛА типа конвертоплан

### **1.3 Основные положения прикладной теории управления беспилотными летательными аппаратами**

Прикладная теория управления БПЛА занимается созданием математических алгоритмов и методов управления различными видами беспилотных летательных аппаратов, что позволяет решать соответствующие задачи.

Прикладная теория управления БПЛА основана на следующих принципах:

- 1) Принцип комплексного охвата моделями и методами теории всех этапов полета БПЛА.

Для реализации этого принципа требуется спроектировать программу с использованием методов теории, которая покрывает все этапы полета конкретного БПЛА от его взлета до посадки на заданном аэродроме.

2) Принцип учета возмущений, в частности ветровых, действующих на всех этапах полета БПЛА

БПЛА имеют значительный разброс по массе, скорости и высоте полета при том, что отношение силы тяги к силе веса относительно небольшое. Поэтому при разработке методов прикладной теории управления БПЛА необходимо учитывать неблагоприятные условия эксплуатации.

3) Принцип формирования траектории полета БПЛА, наиболее подходящей для решения конкретной целевой задачи.

Соблюдение данного принципа позволяет персоналу БАК создавать оптимальные траектории полета для БПЛА, учитывая текущие условия и опыт предыдущих полетов. В этом случае рекомендуется использовать методы теории обратных задач управления, вариационного исчисления и оптимального управления динамическими объектами.

4) Принцип обеспечения минимальной трудоемкости решения задач программирования полетов БПЛА.

Применение определенных методов и алгоритмов теории позволяет определять управление конкретным БПЛА и моделировать его движение на программно-аппаратных средствах с ограниченной вычислительной мощностью.

Вышеописанные принципы непосредственно учитываются в математических моделях движения БПЛА на различных этапах его полета. Для описания математических моделей с помощью уравнений вводятся СК.

Для определения координат БПЛА наиболее распространенным методом является определение позиции центра масс относительно Земли в нормальной земной системе координат. Эта система координат представляет собой жестко связанную с Землей инерциальную декартову прямоугольную систему координат  $Ox_g Y_g Z_g$ .

$Ox_g Y_g Z_g$  – нормальная СК, начало которой (точка  $O$ ) помещено в центр масс БПЛА. Ось  $OY_g$  направлена по линии местной вертикали вверх, а оси  $Ox_g$  и  $OZ_g$  расположены в плоскости местного горизонта так, что ось  $Ox_g$

направлена по касательной, а ось  $OZ_g$  - по нормали к траектории полёта. Когда ось  $OX_g$  направлена в сторону полета, то координата  $X_g$  характеризует дальность полета  $L$ , координата  $Y_g$  — высоту полета  $H$ , а координата  $Z_g$  — боковое смещение. Данная система координат характеризует положение БПЛА.

Ориентация БПЛА происходит с помощью системы координат, жестко связанной с БПЛА, которая называется связанной СК.

$OXYZ$  – связанная СК, начало которой (точка  $O$ ) также совпадает с центром масс БПЛА. Связанная система координат жестко связана с БПЛА. Ось  $OX$  совпадает с горизонтальной строительной осью БПЛА, ось  $OZ$  совпадает с его поперечной осью, ось  $OY$  – нормальная ось и направлена вверх, т.е. получается, что оси  $OY$  и  $OZ$  ортогональны оси  $OX$ , образуя левую систему координат.

Положение строительных осей БПЛА связанной СК определяется следующими углами:

- углом между продольной осью  $OX$  и горизонтальной плоскостью  $X_gOZ_g$ , который называется углом тангажа и обозначается  $\alpha$ ;
- углом между поперечной осью  $OZ$  и горизонтальной плоскостью  $X_gOZ_g$ , который называется углом крена и обозначается  $\vartheta$ ;
- углом между осью  $OX_g$  и проекцией оси  $OX$  на горизонтальную плоскость  $X_gOZ_g$ , который называется углом рыскания и обозначается  $\psi$ .

Эти углы ориентации БПЛА называют углами Эйлера и представлены на рисунке 7.

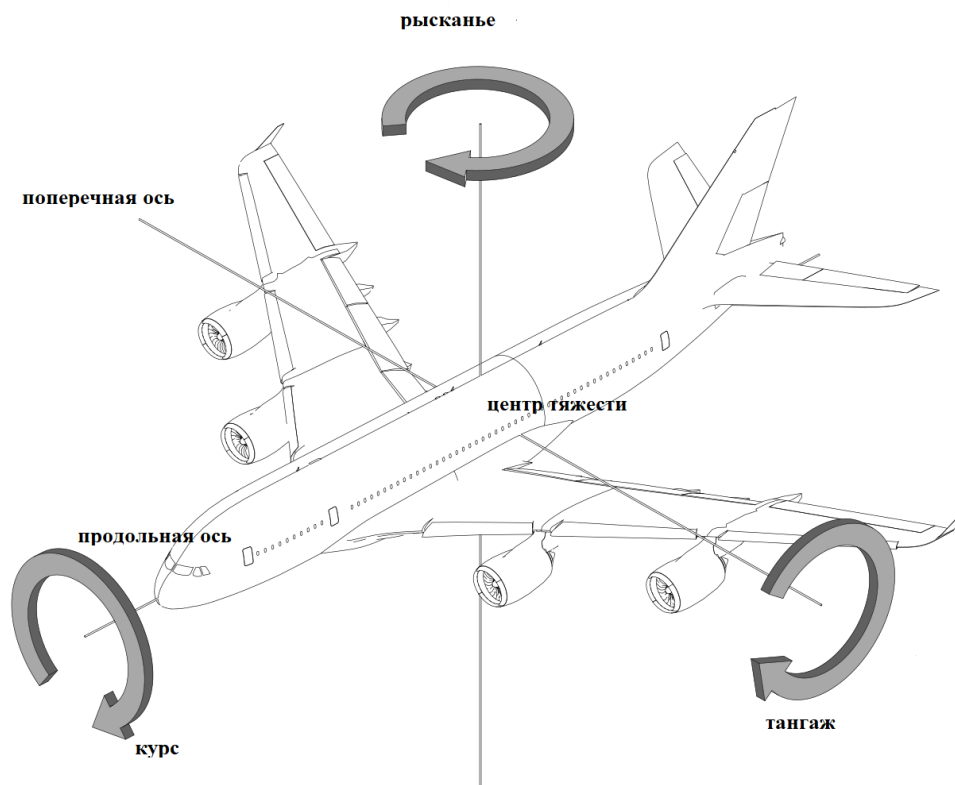


Рисунок 7 – Углы Эйлера

Скорость БПЛА при поступательном движении определяется как скорость его центра масс относительно воздуха, или воздушная скорость  $\vec{V}$ . Именно эта скорость создает подъемную силу. Направление движения БПЛА, при отсутствии ветра, определяется ориентацией вектора скорости  $\vec{V}$  центра масс или осей системы координат, где ось  $OX$  совпадает с вектором скорости.

При исследовании направления движения БПЛА пользуются скоростной и траекторной СК.

$OX_a Y_a Z_a$  – скоростная СК с началом (точка  $O$ ), помещенным в центр масс БПЛА и связанная с вектором  $\vec{V}$  линейной скорости БПЛА таким образом, что ось  $OX_a$  направлена по вектору скорости самолета (скоростная ось), ось  $OY_a$  направлена вертикально вверх, т.е. направлена перпендикулярно вектору скорости и лежит в продольной плоскости симметрии БПЛА (ось подъёмной силы), а ось  $OZ_a$  влево с образованием левой системы координат (боковая ось).

Положение связанной СК относительно скоростной определяется углами скольжения  $\beta$  и атаки  $\alpha$ . Угол  $\beta$  образован осью  $OX_a$  и её проекцией на продольную плоскость симметрии БПЛА, а угол  $\alpha$  образован осью  $OX$  и проекцией вектора  $\vec{V}$  на плоскость симметрии БПЛА.

$OX_k Y_k Z_k$  — траекторная СК с началом (точка  $O$ ), помещенным в центр масс, ось  $OX_k$  направлена по вектору линейной скорости  $V$ , ось  $OY_k$  направлена вверх и перпендикулярна вектору скорости  $\vec{V}$ , но лежит в вертикальной плоскости, содержащей вектор линейной скорости, ось  $OZ_k$  перпендикулярна вектору скорости, направлена влево и лежит в горизонтальной плоскости.

Задать направление движения самолета (другими словами, ориентировать вектор воздушной скорости  $\vec{V}$ ) можно путем ориентации осей траекторной или скоростной системы координат. Ориентация осей скоростной системы координат осуществляется как относительно осей земной системы координат, так и относительно самого БПЛА. [5]

В данной теории применяются левые СК, т.к. в задачах, решаемые пользователями БПЛА, используются положительные значения координаты  $z$ .

На рисунке 8 представлены правые нормальная и связанная СК, где показаны углы Эйлера, с помощью которых строится связанная СК, а на рисунке 9 правые связанная и скоростная СК, где представлены угол атаки и угол скольжения, которые определяют положение связанной СК.

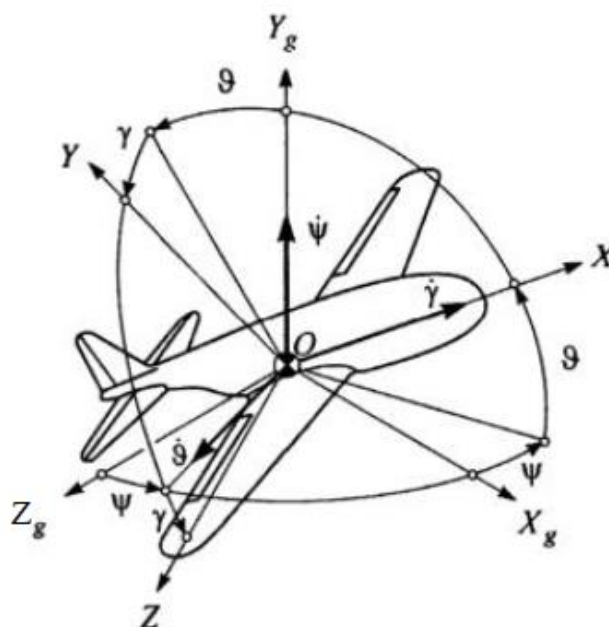


Рисунок 8 – Нормальная и связанная СК

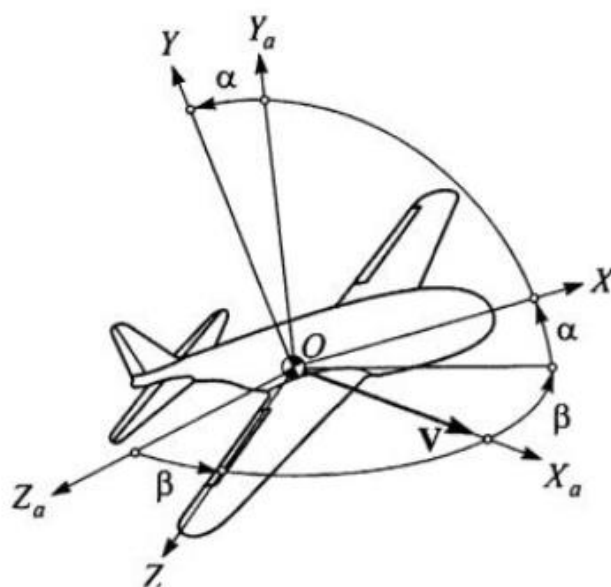


Рисунок 9 – Связанная и скоростная СК

При практическом решении задач управления в полетах всех видов БПЛА выделяется несколько этапов:

- 1) Взлет и набор заданной высоты полета;
- 2) Горизонтальный полет в зону выполнения ПЗ;
- 3) Выполнение ПЗ;
- 4) Полет в зону посадки;



### 5) Снижение и посадка.

Для упрощения решения задач управления полетом БПЛА на различных этапах используется набор вспомогательных СК, включая стартовую и маневренную, которые можно увидеть на рисунке 10.

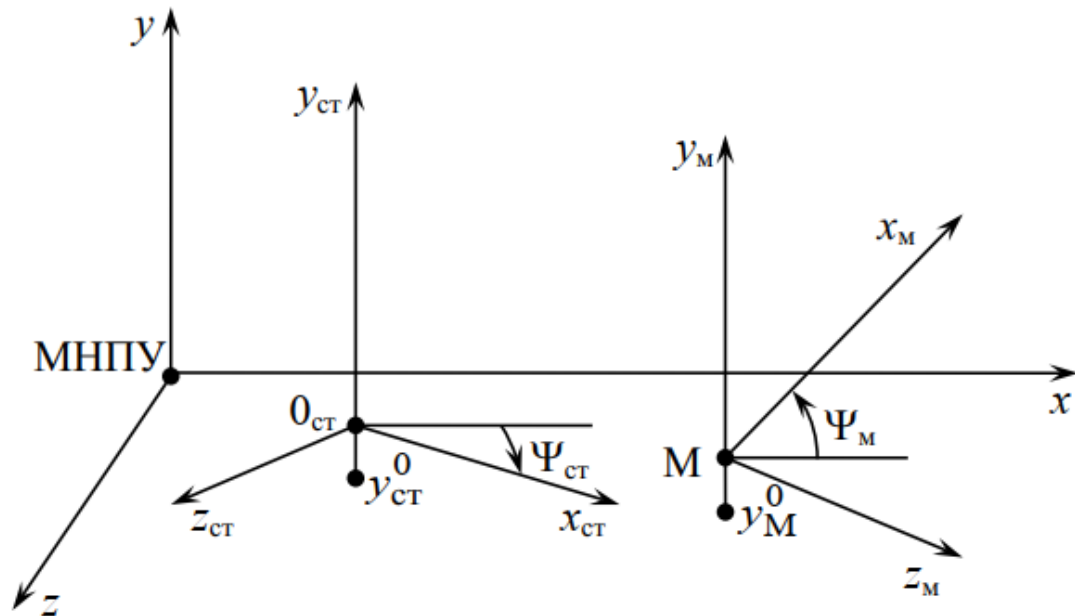


Рисунок 10 – Вспомогательные СК: стартовая и маневренная

Положение стартовой СК относительно земной системы МНПУ $xyz$  определяется углом поворота  $\Psi_{ст}$ , отражающим направление полета при старте с МПУ БАК или осью площадки взлета и посадки. В таком случае, ось 0ст $x_{ст}$  будет направлена под углом  $\Psi_{ст}$  к оси МНПУ $x$ , а ось 0ст $z_{ст}$  – на тот же угол повернута относительно оси МНПУ $z$ . Ось МНПУ $y$  и 0ст $y_{ст}$  совпадают, и точка 0ст может располагаться на высоте  $y_{ст}^0$  относительно уровня МНПУ БАК.

Маневренная СК, в свою очередь, определяется началом в точке М и поворотом оси М $x_M$  на угол  $\Psi_M$  относительно оси МНПУ $x$ . Направления осей М $y_M$  и МНПУ $y$  совпадают, и точка М также может располагаться на высоте  $y_M^0$  относительно уровня МНПУ БАК.

В связанной системе координат движение БПЛА описывается уравнениями Эйлера, которые состоят из шести нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Эти уравнения включают силы и моменты, которые сложным образом зависят от высоты, скорости и режима полёта, и меняются во времени. Это обусловлено изменением условий полёта, таких как изменение массы и момента инерции БПЛА в результате расхода топлива или сброса груза.

Основные параметры физической модели БПЛА описываются и задаются по-разному в отличие от типа беспилотного аппарата. В качестве примера в данном случае рассматриваются два наиболее распространенных: самолетного типа и квадрокоптеры.

Для самолетного типа аэродинамические силы можно представить через продольную и нормальную силы связанной системы координат,  $X$  и  $Y$  соответственно по формуле (1):

$$\begin{cases} X = Y_a \alpha - X_a; \\ Y = Y_a + X_a \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где  $X_a$  — сила аэродинамического сопротивления;

$Y_a$  — аэродинамическая подъемная сила;

$\alpha$  — угол атаки.

Тогда уравнения баланса сил в проекциях на связанную систему координат записывается по формуле (2):

$$\begin{cases} P + X - G \sin \nu; \\ Y - G \cos \nu = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $P$  — сила тяги силовой установки;

$G$  — вес БПЛА;

$\nu$  — угол тангажа.

На рисунке 11 изображены характерные для БПЛА самолетного типа параметры физической модели, а также присутствуют следующие обозначения:

$Ox_g y_g z_g$  – земная система координат;

$Ox_a y_a$  – скоростная система координат;

$Ox y$  – связанная система координат. [6]

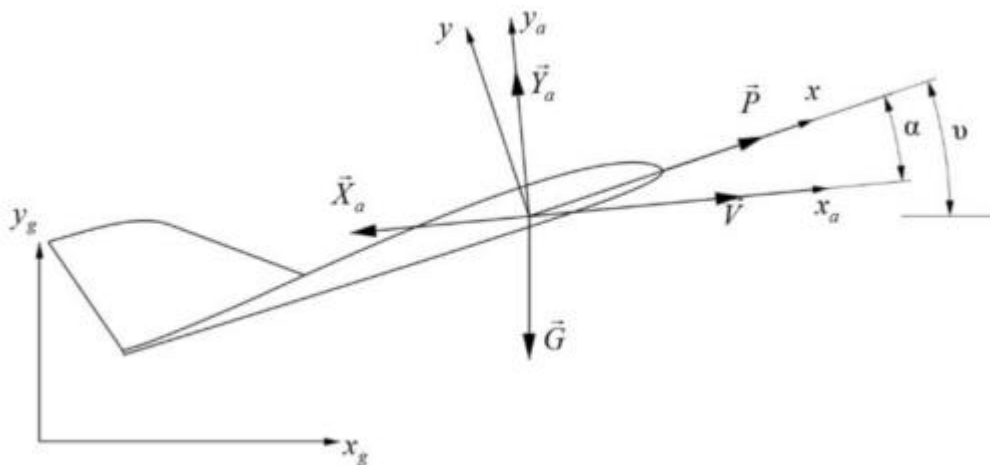


Рисунок 11 – Системы координат и силы, действующие на БПЛА самолетного типа.

Физическая модель квадрокоптеров имеет свои особенности. Жестко связанная с квадрокоптером система координат формируется с помощью осей  $OXYZ$ . В то же время, наблюдатель находится в стартовой системе координат, оси которой обозначаются как  $Ox_{ст}$ ,  $Oy_{ст}$ ,  $Oz_{ст}$ . Для управления движением квадрокоптера на двигатели подаются управляющие напряжения, вызывающие вращение винтов и возникновение подъемных сил  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$ , формирующих результирующую подъемную силу и соответствующие реактивные моменты  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  и  $M_4$ . Соответствующая схема сил, моментов и СК приведена на рисунке 12. Ориентация квадрокоптера в пространстве определяется тремя углами: углом крена ( $\alpha$ ), тангажа ( $\nu$ ) и рыскания ( $\psi$ ). Для изменения ориентации квадрокоптера используются различные значения угловых скоростей  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  и  $\omega_4$ , а также подъемные силы  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$ .

Обеспечение движения в вертикальной плоскости осуществляется за счет проекции суммарного вектора подъемной силы  $P$  на вертикальную ось, а поворот квадрокоптера по углу рыскания зависит от разности значений угловых скоростей  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  и  $\omega_4$ . Поворот осуществляется в положительном направлении, если угловые скорости  $\omega_2$  и  $\omega_4$  больше, чем  $\omega_1$  и  $\omega_3$ , а в отрицательном направлении - наоборот. Повороты по углам крена и тангажа происходят за счет различия подъемных сил  $P_1$ ,  $P_3$  и  $P_2$ ,  $P_4$  соответственно. [7]

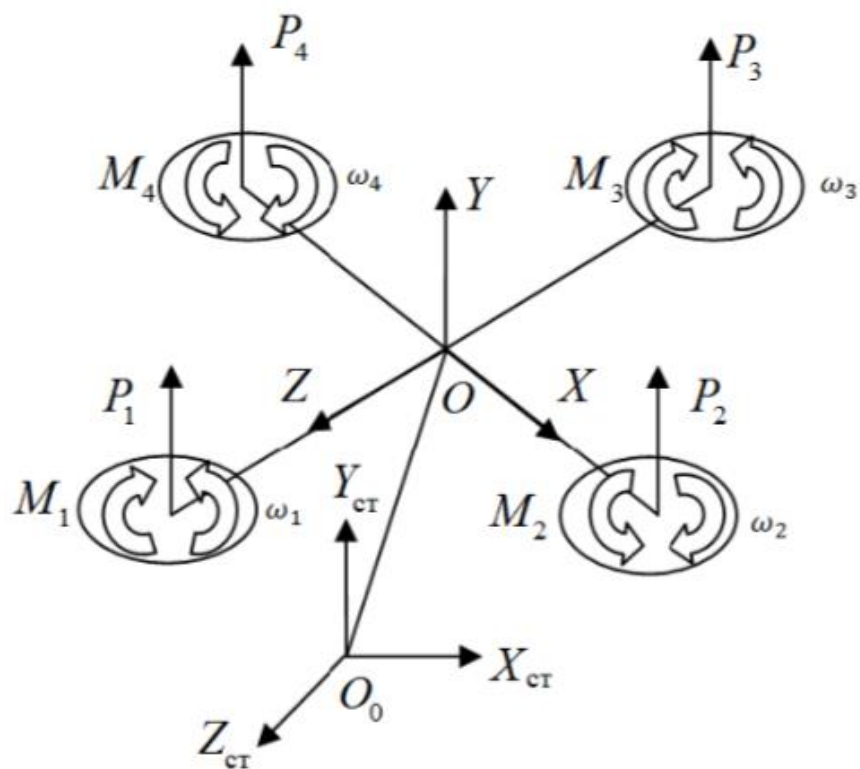


Рисунок 12 – Системы координат, моменты и силы, действующие на квадрокоптер

## 2 Построение траектории БПЛА самолетного типа

### 2.1 Модель движения БПЛА

Анализируя БПЛА самолетного типа, можно сказать, что он является твердым телом с шестью степенями свободы, включающими три вида поступательных движения центра масс в разных направлениях и вращательное движение относительно центра масс, которых тоже три вида, т.е. относительно всех трех осей. Модель движения центра масс БПЛА представлена в скоростной системе координат и может быть записана следующей формулой (3):

$$\begin{cases} m\dot{V} = \sum F_x; \\ mV\omega_z = \sum F_y; \\ mV \cos \vartheta \omega_y = \sum F_z, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\sum F_x, \sum F_y, \sum F_z$  – векторные суммы проекций всех сил, которые действуют на БПЛА относительно соответствующих осей скоростной системы координат;

$V$  – скорость движения тела;

$\dot{V}$  – производная скорости объекта по времени;

$m$  – масса тела;

$\vartheta$  – угол тангажа;

$\vartheta$  – величина угла наклона траектории движения;

$\omega_y, \omega_z$  – угловые скорости вращательного движения тела, рассчитанные относительно соответствующих осей связанной системы координат. [8]

Уравнения для описания вращения БПЛА относительно его центра масс в связанной системе координат представлены в формуле (4):

$$\begin{cases} J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z = M_x; \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z = M_y; \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y = M_z, \end{cases} \quad (4)$$

где  $J_x, J_y, J_z$  — главные центральные моменты инерции тела, действующие относительно осей системы координат, связанной с телом;

$M_x, M_y, M_z$  — суммы проекций моментов всех действующих сил на соответствующие оси;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$  — угловые скорости вращательного движения тела, рассчитанные относительно соответствующих осей связанной системы координат.

Органы управления БПЛА классической схемы могут влиять следующим образом на параметры движения:

$\delta_n$  — угол отклонения руля направления, влияет на величину угловой скорости  $\omega_y$ , угла рыскания  $\psi$  и момента  $M_y$ ;

$\delta_e$  — угол отклонения элеронов, влияет на величину угловых скоростей  $\omega_x, \omega_y$ , угла крена  $\gamma$  и момента  $M_x, M_y$ ;

$\delta_\theta$  — угол отклонения руля высоты, влияет на величину угловой скорости  $\omega_z$ , угла тангажа  $\theta$  и момента  $M_z$ .

На практике  $\delta_n$  принимает положительное значение при отклонении руля направления вправо, а отклонения органов управления вниз соответствуют положительным углам  $\delta_\theta$  и  $\delta_e$ .

При решении задач движения обычно используются упрощенные модели управляемого полета, принимая объект управления за материальную точку с массой  $m$ .

В реальных условиях изменение управляющих органов не приводит к мгновенным изменениям углов, а время переходных процессов зависит от

колебаний тела вокруг центра масс. Однако, предполагается, что время переходных процессов достаточно мало и установка углов  $\alpha, \beta, \gamma$  происходит мгновенно, что обосновывается инерционностью движения центра масс. С учетом этого предположения, объект управления можно считать вращающимся без вращения, что соответствует формуле (5):

$$J_x = J_y = J_z = 0. \quad (5)$$

Тогда по формуле (6):

$$M_x = M_y = M_z = 0. \quad (6)$$

БПЛА, для которого выполняются условия (6) во время всего движения, называют устойчивым сбалансированным объектом. Угловые скорости по осям  $Oy$  и  $Oz$  заменяются следующим образом по формуле (7):

$$\begin{aligned} \omega_y &= \dot{\psi}; \\ \omega_z &= \dot{\vartheta}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\dot{\psi}$  – угловая скорость по курсу;

$\dot{\vartheta}$  – угловая скорость наклона траектории.

Тогда уравнения (3) запишется в следующем виде, как показано в формуле (8):

$$\begin{cases} m\dot{V} = \sum F_x; \\ mV\dot{\vartheta} = \sum F_y; \\ mV\cos \vartheta \dot{\psi} = \sum F_z. \end{cases} \quad (8)$$

При движении БПЛА возникают следующие силы:  $P$  – тяга двигателя,  $X$  – лобовое сопротивление,  $Y$  – подъемная сила,  $Z$  – боковая сила и  $G = mg$  – сила тяжести.

Проекция сил на ось  $Ox$  по формуле (9):

$$\sum F_x = P \cos \alpha - X - G \sin \vartheta, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – угол атаки.

Проекция сил на ось  $Oy$  по формуле (10):

$$\sum F_y = P \sin \alpha + Y - G \cos \vartheta. \quad (10)$$

Пусть БПЛА движется на постоянной высоте и для осуществления бокового маневра необходима рулевая корректировка, которая вызовет появление боковой силы  $Z$ . Кроме этого, можно изменить угол крена  $\gamma$ , регулируя при этом рулем элеронов  $\delta_e$ , чтобы совершить боковое движение. Изменение угла крена вызовет появление угла скольжения  $\beta$ , тогда проекция сил на ось  $Oz$  будет записана по формуле (11):

$$\sum F_z = \cos \gamma (-P \cos \alpha \sin \beta + Z) + \sin \gamma (P \sin \alpha + Y). \quad (11)$$

Углы  $\alpha, \beta$  имеют ограничение  $20^\circ$ , т.е. приближенно можно считать, что  $\cos \alpha \approx 1$ ,  $\cos \beta \approx 1$ , также можно принять следующее упрощение в связи с малостью углов  $\alpha$  и  $\beta$   $\sin \alpha \approx \alpha$ ,  $\sin \beta \approx \beta$ , где углы измеряются в радианах. Следовательно система уравнений (8) будет записана по формуле (12):



$$\begin{cases} m\dot{V} = P \cos \alpha \cos \beta - X - mg \sin \vartheta; \\ mV\dot{\vartheta} = (P\alpha + Y) \cos \gamma - (Z - P\beta) \sin \gamma - mg \cos \vartheta; \\ mV \cos \vartheta \dot{\psi} = (P\alpha + Y) \sin \gamma + (Z - P\beta) \cos \gamma. \end{cases} \quad (12)$$

Из-за конструкции фюзеляжа и малой площади вертикального оперения, боковой способ маневрирования БПЛА, который выполняется плоским разворотом при  $\gamma = 0$ , не является эффективным в обеспечении необходимой боковой аэродинамической силы  $Z$  для обеспечения маневренности при малых углах  $\beta$ . Большинство БПЛА проектируются с учетом использования изменения угла крена  $\gamma \neq 0$  для бокового маневрирования, предполагая  $\beta = 0$  и  $Z = 0$ . При проектировании учитывается также угол  $\phi$  установки двигателя, угол между осью двигателя и строительной осью летательного аппарата, который обеспечивает продольную устойчивость движения. Приняв эти уточнения, модель движения БПЛА будет описываться следующей формулой (13):

$$\begin{cases} \dot{V} = \frac{P - X}{m} - g \sin \vartheta; \\ \dot{\vartheta} = \frac{(P(\alpha + \phi) + Y) \cos \gamma}{mV} - \frac{g \cos \vartheta}{V}; \\ \dot{\psi} = \frac{(P(\alpha + \phi) + Y) \sin \gamma}{mV \cos \vartheta}; \\ \dot{x} = V \cos \vartheta \cos \psi; \\ \dot{y} = V \sin \vartheta; \\ \dot{z} = V \cos \vartheta \sin \psi. \end{cases} \quad (13)$$

Представить модель движения объекта управления можно в воздействующих на тело перегрузках и где  $\gamma$  является углом наклона перегрузками.

Проекция перегрузки на ось  $Ox$  (продольная перегрузка) вычисляется по формуле (14):

$$n_x = \frac{P - X}{mg}. \quad (14)$$

Проекция перегрузки на ось Оу (поперечная перегрузка) вычисляется по формуле (15):

$$n_y = \frac{P(\alpha + \phi) + Y}{mg}. \quad (15)$$

Также стоит отметить, что координате вдоль оси Оу земной СК соответствует высота полета Н, координате вдоль оси Ох земной СК – дальность полета L, а координате вдоль оси Oz земной СК – боковое отклонение Z.

Таким образом, модель движения БПЛА описывается системой, которая представлена в формуле (16):

$$\begin{cases} \dot{V} = (n_x - \sin \vartheta)g; \\ \dot{\vartheta} = \frac{(n_y \cos \gamma - \cos \vartheta)g}{V}; \\ \dot{\psi} = \frac{n_y g \sin \gamma}{V \cos \vartheta}; \\ \dot{H} = V \sin \vartheta; \\ \dot{L} = V \cos \vartheta \cos \psi; \\ \dot{Z} = -V \cos \vartheta \sin \psi. \end{cases} \quad (16)$$

В рамках рассматриваемой модели ставится терминальная задача, которая состоит в выборе управления, при котором ЛА из начального состояния переходит в конечное, где  $H_0, L_0, Z_0, V_0, \vartheta_0, \psi_0$  – переменные начального состояния, а  $H_*, L_*, Z_*, V_*, \vartheta_*, \psi_*$  – переменные конечного состояния, а также заданы начальные  $n_{x0}, n_{y0}, \gamma_0$  и конечные  $n_{x*}, n_{y*}, \gamma_*$  значения управления.

Если задано время движения, то возможно применение метода обратных задач динамики. Замена управлений, которая представлена формулами (17)-(19):

$$v_1 = n_x, \quad (17)$$

$$v_2 = n_y \cos \gamma, \quad (18)$$

$$v_3 = n_y \sin \gamma \quad (19)$$

приводит к тому, что система становится аффинной, т.е. получается нелинейная система, которая линейна по управлениям. Она приводится к каноническому виду и записывается в векторном виде по формуле (20):

$$\ddot{r} = g(A + Bv), \quad (20)$$

где  $r = \begin{pmatrix} H \\ L \\ Z \end{pmatrix};$

$$v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix};$$

$$A = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} \sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ \cos \vartheta \cos \psi & -\sin \vartheta \cos \psi & \sin \psi \\ -\cos \vartheta \sin \psi & \sin \vartheta \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix};$$

$g$  – ускорение свободного падения (элементы матрицы  $B$  следует рассматривать как функции переменных состояния  $\dot{H}, \dot{L}, \dot{Z}$ ).

Следуя выбранному методу обратных задач динамики, выбирается траектория движения БПЛА  $r(t)$  такая, что удовлетворяет заданным граничным условиям, и рассчитывается управление в форме обратной связи.

Если время движения не задано, то независимую переменную, в данном случае время, заменяют другим параметром – нормированной механической энергией, которая записывается в виде формулы 21:

$$E = H + \frac{V^2}{2g}. \quad (21)$$

Система уравнений (16) запишется в следующей форме, которая представлена формулой (22):

$$\left\{ \begin{array}{l} V' = \frac{(v_1 - \sin \vartheta)g}{Vv_1}; \\ g' = \frac{(v_2 - \cos \vartheta)g}{V^2v_1}; \\ \psi' = \frac{v_3g}{V^2v_1 \cos \vartheta}; \\ H' = \frac{\sin \vartheta}{v_1}; \\ L' = \frac{\cos \vartheta \cos \psi}{v_1}; \\ Z' = -\frac{\cos \vartheta \sin \psi}{v_1}. \end{array} \right. \quad (22)$$

Для системы (22) известны начальное и конечное значения переменной  $E$ , что позволяет определить диапазон ее изменения. Граничные условия терминальной задачи для системы (16) задают начальные и конечные значения переменных  $H$ ,  $L$ ,  $Z$  и их первых производных по  $E$ . Одновременно из этих условий вытекают пары линейных уравнений, которым подчинены вторые производные  $H$ ,  $L$ ,  $Z$  по  $E$  в начальной и конечной точках. Решение данной

задачи может быть получено среди полиномов пятой степени, зависящих от энергии.

Для использования, приведенного выше метода необходимо, чтобы движение БПЛА сопровождалось монотонным изменением механической энергии во времени. Для существования траектории с монотонным изменением энергии необходимо и достаточно, чтобы начальные и конечные значения управлений удовлетворяли условиям согласования, формула (23):

$$\begin{aligned} n_{x0} \text{sign}(E_* - E_0) &> 0, \\ n_{x*} \text{sign}(E_* - E_0) &> 0, \end{aligned} \quad (23)$$

где  $E_0 = H_0 + \frac{V_0^2}{2g}, E_* = H_* + \frac{V_*^2}{2g}$  – начальное и конечное значения энергии.

## 2.2 Начальный и конечный переходные маневры

Один из методов планирования траекторий летательных аппаратов при нарушении условия согласования состоит в выполнении кратковременного маневра в начальной или конечной точке, чтобы изменить знак продольной перегрузки. Этот маневр должен быть кратковременным, чтобы в начальной (конечной) точке величина продольной перегрузки была небольшой. Тем не менее, это позволяет предположить, что для новой начальной (конечной) точки изменение энергии на траектории будет иметь тот же знак, что и для исходной точки, поэтому новая точка будет соответствовать условию согласования.

Если нарушено первое неравенство в формуле (23), то происходит следующее:

1) Вводится обозначение:

$x_0 = (H_0, L_0, Z_0, V_0, \vartheta_0, \psi_0)^T$  – начальная точка фазовой траектории;

$x_* = (H_*, L_*, Z_*, V_*, \vartheta_*, \psi_*)^T$  – конечная точка траектории;

2) Задается некоторая величина  $T_n$  интервала времени переходного режима, который должен быть больше шага интегрирования, но в то же время должен быть относительно мал.

3) Предполагается, что значение  $v_{10}$  управления  $v_1$  в начальной точке  $x_0$  мало:  $|v_{10}| < \delta$ . Согласно предположения, значение  $v_{10}$  не удовлетворяет условию согласования по энергии для пары точек  $x_0$  и  $x_*$ , но этому условию удовлетворяет значение  $-v_{10}$ .

4) Реализуется движение летательного аппарата за период времени  $T_n$  с программным управлением, представленным в формулах (24)-(26), где  $t \in [0, T_n]$ .

$$v_1 = v_{10} - 2 \frac{v_{10}}{T_n} t, \quad (24)$$

$$v_2 = v_{20}, \quad (25)$$

$$v_3 = v_{30}. \quad (26)$$

По окончании движения продольная перегрузка  $v_1$  примет значение  $-v_{10}$ , а БПЛА переместится в точку  $x_s$ , достаточно близкую к точке  $x_0$ . С учетом близости точек  $x_0$  и  $x_s$  можем считать, что величины  $E_* - E_0$  и  $E_* - E_s$ , где  $E_s$  – значение энергии в точке  $x_s$ , имеют одинаковый знак. Если второе неравенство из формулы (23) выполнено, то пара точек  $x_s, x_*$  удовлетворяет условиям согласования, и для этой пары можно строить траекторию с монотонным изменением энергии.

Описанный маневр называется начальным переходным маневром.

Если допустить, что условия согласования нарушены в конечной точке  $x_*$  планируемой траектории и если значение  $n_{x*} = v_1$  в точке  $x_*$  мало, то можно использовать конечный переходный маневр. Он заключается в том, что траектория из начальной точки  $x_0$  прокладывается не в конечную точку  $x_*$ , а в близкую к ней точку  $x_f$ , а затем реализуется специальный режим полета из точки  $x_f$  в точку  $x_*$ .

В точке  $x_*$  фазового пространства системы известны положение  $r_* = (H_*, L_*, Z_*)^T$  БПЛА в пространстве, скорость его движения  $V_* = (\dot{H}_*, \dot{L}_*, \dot{Z}_*)^T$ , характеризующаяся модулем  $V_*$  и углами ориентации  $\vartheta_*$  и  $\psi_*$ , а также значения управлений  $v_{1*}, v_{2*}, v_{3*}$ , которые определяют значения вторых производных  $\ddot{H}_*, \ddot{L}_*, \ddot{Z}_*$ . Установив время специального режима  $T_n$ , рассчитаем такое движение БПЛА на интервале времени  $[-T_n, 0]$ , для которого точка  $x_*$  является конечной, причем в начальной точке  $x_f$  этого движения управление  $v_1$  имеет заданное значение  $v_{1f}$ . Для упрощения расчетов начальные значения  $v_{2f}$  и  $v_{3f}$  управлений  $v_2$  и  $v_3$  принимаются известными, причем  $v_{2f} = v_{2*}$  и  $v_{3f} = v_{3*}$ .

Траекторию движения БПЛА можно задать в виде многочлена третьей степени по формуле (27):

$$r(t) = r_* + \dot{r}_* t + \frac{\ddot{r}_*}{2} t^2 + \frac{k}{6} t^3, t \in [-T_n, 0], \quad (27)$$

где  $\dot{r}_*$ ,  $\ddot{r}_*$  — первая и вторая производные вектор-функции  $r(t) = (H(t), L(t), Z(t))^T$  в конечной точке  $t = 0$ ;

$k$  — вектор неизвестных коэффициентов, которые следует определить исходя из условия, что при  $t = -T_n$  вектор перегрузок  $v_f = (v_{1f}, v_{2f}, v_{3f})^T$  известен.

Матрицы  $A$  и  $B$  в конечной точке вычисляются по формулам (28) и (29)[8]:

$$A = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (28)$$

$$B_* = \begin{pmatrix} \sin \vartheta_* & \cos \vartheta_* & 0 \\ \cos \vartheta_* \cos \psi_* & -\sin \vartheta_* \cos \psi_* & \sin \psi_* \\ -\cos \vartheta_* \sin \psi_* & \sin \vartheta_* \sin \psi_* & \cos \psi_* \end{pmatrix}. \quad (29)$$

Тогда по формуле (30):

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}_* &= \dot{\mathbf{V}}_* \begin{pmatrix} B_{11*} \\ B_{21*} \\ B_{31*} \end{pmatrix}, \\ \ddot{\mathbf{r}}_* &= g(A + B_* \mathbf{v}_*). \end{aligned} \quad (30)$$

Из уравнения (27) вытекает, что  $\ddot{\mathbf{r}}(t) = \ddot{\mathbf{r}}_* + k\mathbf{t}$ . Следовательно, в начальной точке  $\mathbf{x}_f$  справедливо равенство  $\ddot{\mathbf{r}}_f = \ddot{\mathbf{r}}(-T_n) = \ddot{\mathbf{r}}_* - kT_n$ . Через значения управлений  $\mathbf{v}_f$  ускорение  $\ddot{\mathbf{r}}_f$  выражается с помощью системы дифференциальных уравнений и получается формула (31):

$$\ddot{\mathbf{r}}_f = g(A + B_f \mathbf{v}_f), \quad (31)$$

где  $B_f$  – матрица  $B$ , вычисленная в точке  $\mathbf{x}_f$ .

Матрица  $B_f$  есть функция параметров  $\mathbf{V}_f, \vartheta_f, \psi_f$ , которые в свою очередь выражаются через координаты вектора  $\dot{\mathbf{r}}_f$  и являются функциями векторного параметра  $k$ , т.е.  $B_f = B_f(k)$ . В результате получается уравнение, которому



должен удовлетворять векторный параметр  $k$  и которое записано в уравнении (32):

$$g(A + B_f(k)v_f) = \ddot{r}_* - kT_n. \quad (32)$$

Отсюда  $k$  вычисляется по формуле (33):

$$k = \frac{\ddot{r}_* - g(A + B_f(k)v_f)}{T_n}. \quad (33)$$

Уравнение (33) нелинейное и может быть решено лишь численно. Оно представлено в виде, удобном для применения метода простой итерации, т.е. построения последовательности, как в формуле (34):

$$k_{j+1} = \frac{\ddot{r}_* - g(A + B_f(k_j)v_f)}{T_n}. \quad (34)$$

В качестве начального значения естественно выбрать  $k=0$ , что является решением уравнения, например, при горизонтальном полете с постоянной скоростью. Первое приближение можно записать по формуле:

$$k_1 = \frac{\ddot{r}_* - g(A + B_f(0)v_f)}{T_n}. \quad (35)$$

Первое приближение можно использовать в предположении, что скорость движения в течение рассматриваемого режима полета мало меняется по направлению, т.е. поперечная перегрузка близка к 1. Расчёты показывают, что первое приближение можно использовать, если поперечная перегрузка  $n_{y*}$  в конечной точке траектории находится в пределах  $0,8 \leq n_{y*} \leq 1,3$ .

В ситуации более агрессивного маневра можно использовать несколько первых итераций, т.е. положить  $k \approx k_j$ , где  $j=3,4$ . В этом случае диапазон возможных значений нормальной перегрузки расширяется до  $0,6 \leq n_{y*} \leq 1,6$ .

### 2.3 Поиск наиболее благоприятной траектории

Поиск наиболее благоприятной траектории осуществляется в зависимости от нарушения условий согласования, которые приведены в формуле (23). Если в начальной или конечной точке условие согласования нарушено, но значение продольной перегрузки недостаточно мало, то возможный вариант планирования траектории – вставка промежуточных точек. Возможны 3 случая нарушения условий согласования, при этом предполагается, что  $E_0 < E_*$ , т.е. энергия вдоль траектории возрастает.

1 случай: если условие согласования выполнено в конечной точке, но нарушено в начальной  $v_{10} < 0$ , то выбирается точка, в которой значение энергии меньше  $E_0$ . В этой точке устанавливается продольная перегрузка чуть меньше 0, таким образом получается участок траектории, на котором выполнены условия согласования. Достигнув выбранной точки, можно выполнить начальный переходный маневр для смены знака продольной перегрузки. Если при этом условия согласования в конечной точке изначально были выполнены, то они будут выполнены и на всей оставшейся части траектории. Таким образом траектория будет состоять из трех участков:

- 1) участок с монотонным изменением энергии;
- 2) участок, на котором выполняется переходный маневр (стыковочный участок);
- 3) участок с монотонным изменением энергии.

2 случай: если условие согласования выполнено в начальной точке, но нарушено в конечной  $v_{1*} < 0$ , то берется промежуточная точка, в которой значение энергии больше значения  $E_*$ . Далее в выбранной точке

устанавливается продольная перегрузка чуть больше. Достигнув выбранной точки, можно выполнить начальный переходный маневр для смены знака продольной перегрузки и затем выполняется второй маневр с монотонным изменением энергии.

3 случай: если условия согласования нарушены и в начальной, и в конечной точках, то необходимо вставить две промежуточные точки. Таким образом получится три участка с монотонным изменением энергии, которые стыкуются с помощью переходных маневров.

Пусть  $r_0$  и  $r_*$  – начальная и конечная точки планируемой траектории.

Если  $v_{10} < 0$ , то  $r_a$  выбирается согласно формуле (36):

$$r_a = \frac{2}{3}r_0 + \frac{1}{3}r_*, \quad (36)$$

т.е. выбираемая точка делит отрезок, соединяющий концы траектории, в отношении 2:1.

Если  $v_{1*} < 0$ , то  $r_b$  выбирается согласно формуле (37):

$$r_b = \frac{1}{3}r_0 + \frac{2}{3}r_*, \quad (37)$$

т.е. выбираемая точка делит отрезок, соединяющий концы траектории, в отношении 1:2.

Для выбранных точек скорость рассчитывается по формуле (38) и (39) соответственно:

$$V_a^2 = \frac{2}{3}V_0^2 + \frac{1}{3}V_*^2, \quad (38)$$

$$V_b^2 = \frac{1}{3} V_0^2 + \frac{2}{3} V_*^2. \quad (39)$$

Затем рассчитывается вертикальное смещение выбранных точек исходя из заданной величины изменения энергии. Так, для точки  $r_a$  (при  $E_0 < E_*$ ) значение высоты вычисляется по формуле (40):

$$H_a = E_0 - \Delta E - \frac{V_a^2}{2g}. \quad (40)$$

Для точки  $r_b$  по формуле (41):

$$H_b = E_0 - \Delta E - \frac{V_b^2}{2g}. \quad (41)$$

Дополнительно, устанавливая в выбранных точках значение углов, учитывается ориентация БПЛА в начальной и конечной точках. Пусть  $\psi_r$  – угол курса, вычисленный для вектора  $r_* - r_0$ , тогда  $\varphi_0 = \psi_0 - \psi_r$  и  $\varphi_* = \psi_* - \psi_r$ . Если  $\varphi_0$  и  $\varphi_*$  одного знака, то речь идет о траектории типа S, которая представлена на рисунке 13. Если же эти величины разного знака, то тип траектории будет U, которая изображена на рисунке 14.

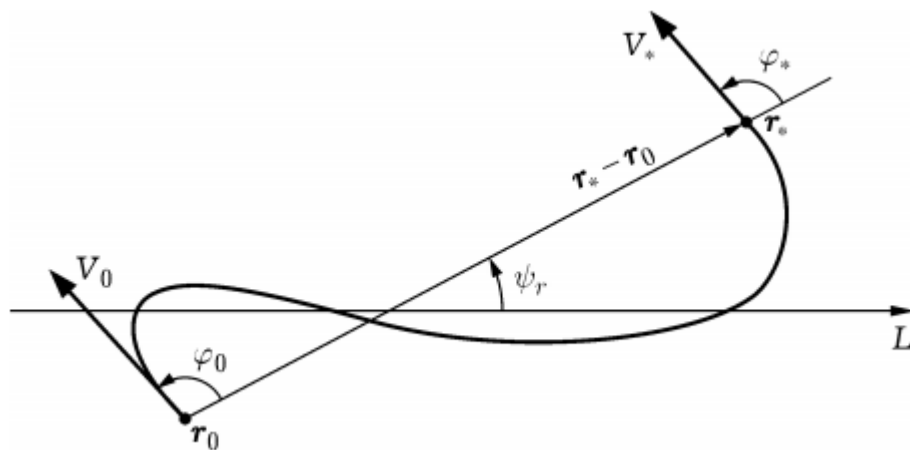


Рисунок 13 – Траектория типа S

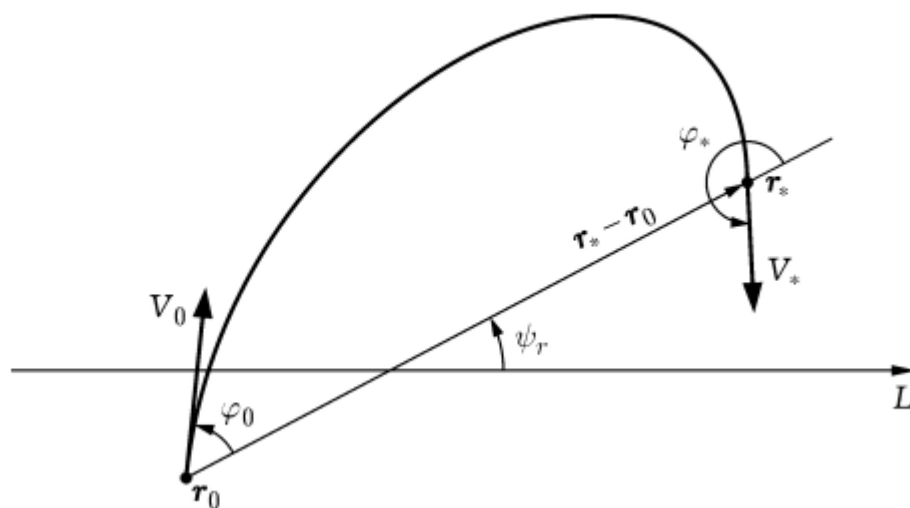


Рисунок 14 – Траектория типа U

Независимо от типа траектории значение  $\vartheta_a$  и  $\vartheta_b$  устанавливаются близкими к 0. Если траектория относится к типу S, то значение  $\varphi_a$  устанавливается равным  $\psi_r \mp 90^\circ$ , при этом знак будет противоположный знакам величин  $\varphi_0$  и  $\varphi_*$ . Если траектория относится к типу U, то выбирается  $\varphi_a = \psi_r$ , но дополнительно выполняется горизонтальное смещение точки в направлении, определяемом углом курса  $\psi_r \mp 90^\circ$ , где знак совпадает со знаком  $\varphi_0$ , Величина смещения  $\tau$  является регулируемым параметром.

Если присутствует точка  $\Gamma_b$ , но отсутствует  $\Gamma_a$ , то параметры в точке  $\Gamma_b$  выбираются по тому же алгоритму, который указан для точки  $\Gamma_a$ . Если присутствуют обе точки  $\Gamma_a$  и  $\Gamma_b$ , то в одной из этих точек параметры выбираются по алгоритму для одной точки и соответствующего типа траектории, а во второй точке – по алгоритму для одной точки и типа траектории U.

### **3 Реализация программного комплекса по нахождению оптимальной траектории**

Для реализации программного комплекса был выбран вычислительный пакет MATLAB. Данная программа была выбрана: так как имеет множество довольно удобных реализованных математических операций и огромное количество уже встроенных функций. Так же в вычислительном пакете MATLAB имеется множество встроенных утилит для отрисовки графики.

В данной работе был реализован графический интерфейс с помощью встроенного в MATLAB пакета App Designer. App Designer объединяет две основные задачи создания приложений — сборка визуальных компонентов графического пользовательского интерфейса и программирование поведения приложения. Конструктор приложений автоматически создает объектно-ориентированный код, определяющий макет и дизайн приложения. Для любых компонентов интерфейса можно создать обратный вызов и запрограммировать для пользовательского взаимодействия, при чем при программировании доступны много возможностей как при обычной работе с MATLAB.

#### **3.1 Разработка интерфейса и функций в App Designer**

На рисунке 15 представлен готовый графический интерфейс с программой, которая ищет оптимальную траекторию полета БПЛА.

Ограничения на переменные состояния БПЛА		
	MIN	MAX
v, км/ч	40	130
$\theta$ , град	-89	89
$\psi$ , град	-179	179
H, м	100	4000
L, м	-70000	70000
Z, м	-20000	20000
Nx	-3	3
Ny	-18	18
$\gamma$ , град	-60	60

Переменные состояния БПЛА в начальной и конечной точке		
	В начальной точке	В конечной точке
v, км/ч	0	0
$\theta$ , град	0	0
$\psi$ , град	0	0
H, м	0	0
L, м	0	0
Z, м	0	0
Nx	0	0
Ny	0	0
$\gamma$ , град	0	0

Узнать подробнее про переменные состояния

Поиск оптимальной траектории

Оптимальное время, с 0

Рисунок 15 – Пользовательский интерфейс приложения для поиска оптимальной траектории

При запуске программы интерфейс выглядит именно так. Ограничения на переменные состояния заданы изначально под определенный тип БПЛА, их можно менять прямо в приложении. Переменные состояния БПЛА в начальной и конечной точке по умолчанию заданы 0, здесь пользователь вносит данные для начальной и конечной точке в зависимости от типа маневра, который совершает беспилотник. Про переменные состояния можно узнать, нажав на кнопку «Узнать подробнее про переменные состояния», тогда в пустом окне появится текст, где расшифрованы все переменные, как на рисунке 16.



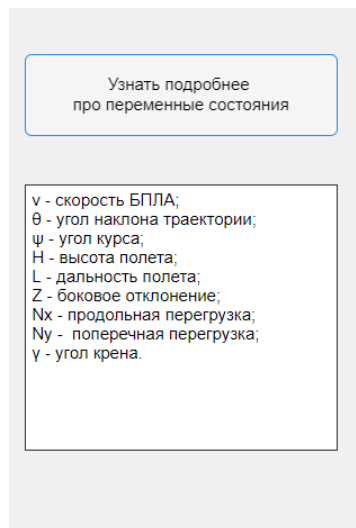


Рисунок 16 – Компоненты приложения, отвечающие за информацию о переменных состояниях

При нажатии кнопки «Найти оптимальную траекторию» происходит следующее:

1) Считываются данные из полей на ограничения переменных состояний БПЛА и полей, описывающих начальное и конечное положение БПЛА.

2) Затем происходит запуск функции «otimal\_trajectoryButtonPushed» внутри программы. Фрагмент листинга кода с функцией «otimal\_trajectoryButtonPushed» представлен в Приложении А. Функция создает переменные, необходимые для работы алгоритма построения траектории, преобразовывает некоторые переменные в зависимости от используемых единиц измерений, а также создает логические флаги. Так же в данную функцию встроен цикл, в котором происходит поиск численных значений полиномов, описывающих траекторию, поиск значений оставшихся переменных и управлений, необходимых для реализации траектории. В цикле полученная траектория проверяется на удовлетворение заданным ограничениям. Цикл завершается, когда  $\text{flagFound} = \text{true}$ , что означает, что процесс поиска оптимального значения  $t$  с точностью  $\varepsilon$  был завершен успешно. После завершения цикла реализованная функция возвращает логический флаг  $\text{flagTimeout} = \text{true}$ , если перебор по времени  $t$  завершился неудачей и траекторию невозможно было найти на отрезке времени  $[0; \Delta t]$ .

3) Если `flagTimeout == true`, то на текстовой панели в приложении появляется предупреждение «Невозможно найти траекторию», пример можно увидеть на рисунке 17. В противном случае появляется надпись «Оптимальная траектория найдена» и в текстовом поле рядом с подписью «Оптимальное время» появляется рассчитанное оптимальное время в секундах, при этом в приложении появляются панели с кнопками для построения графиков, пример можно увидеть на рисунке 18.

Ограничения на переменные состояния БПЛА

	MIN	MAX
v, км/ч	40	130
θ, град	-89	89
ψ, град	-179	179
H, м	100	4000
L, м	-70000	70000
Z, м	-20000	20000
Nx	-3	3
Ny	-18	18
γ, град	-60	60

Переменные состояния БПЛА в начальной и конечной точке

	В начальной точке	В конечной точке
v, км/ч	0	0
θ, град	0	0
ψ, град	0	0
H, м	0	0
L, м	0	0
Z, м	0	0
Nx	0	0
Ny	0	0
γ, град	0	0

Узнать подробнее про переменные состояния

Поиск оптимальной траектории

v - скорость БПЛА;  
θ - угол наклона траектории;  
ψ - угол курса;  
H - высота полета;  
L - дальность полета;  
Z - боковое отклонение;  
Nx - продольная перегрузка;  
Ny - поперечная перегрузка;  
γ - угол крена.

Невозможно найти траекторию

Оптимальное время, с 0

Рисунок 17 – Вид приложения, когда оптимальную траекторию не удалось найти

Ограничения на переменные состояния БПЛА			Переменные состояния БПЛА в начальной и конечной точке			Показать график	
	MIN	MAX	В начальной точке		В конечной точке		
v, км/ч	40	130	v, км/ч	90	80	<div>Пространственная траектория полета</div> <div>График скорости</div> <div>График угла наклона траектории</div> <div>График угла курса</div>	
θ, град	-89	89	θ, град	0	0		
ψ, град	-179	179	ψ, град	0	-90		
H, м	100	4000	H, м	1200	1200		
L, м	-70000	70000	L, м	0	800	<div>Показать графики управлений</div> <div>График продольной перегрузки</div> <div>График поперечной перегрузки</div> <div>График угла крена</div>	
Z, м	-20000	20000	Z, м	0	300		
Nx	-3	3	Nx	0	0		
Ny	-18	18	Ny	1	1		
γ, град	-60	60	γ, град	0	0		

Узнать подробнее про переменные состояния

Поиск оптимальной траектории

v - скорость БПЛА;  
θ - угол наклона траектории;  
ψ - угол курса;  
H - высота полета;  
L - дальность полета;  
Z - боковое отклонение;  
Nx - продольная перегрузка;  
Ny - поперечная перегрузка;  
γ - угол крена.

Оптимальная траектория найдена

Оптимальное время, с 33.49

Рисунок 18 – Вид приложения, когда оптимальная траектория найдена

При нажатии на любую кнопку из панели «Показать график» и «Показать графики управления» в приложении появляется графическое окно с соответствующим графиком, пример можно увидеть на рисунке 19.

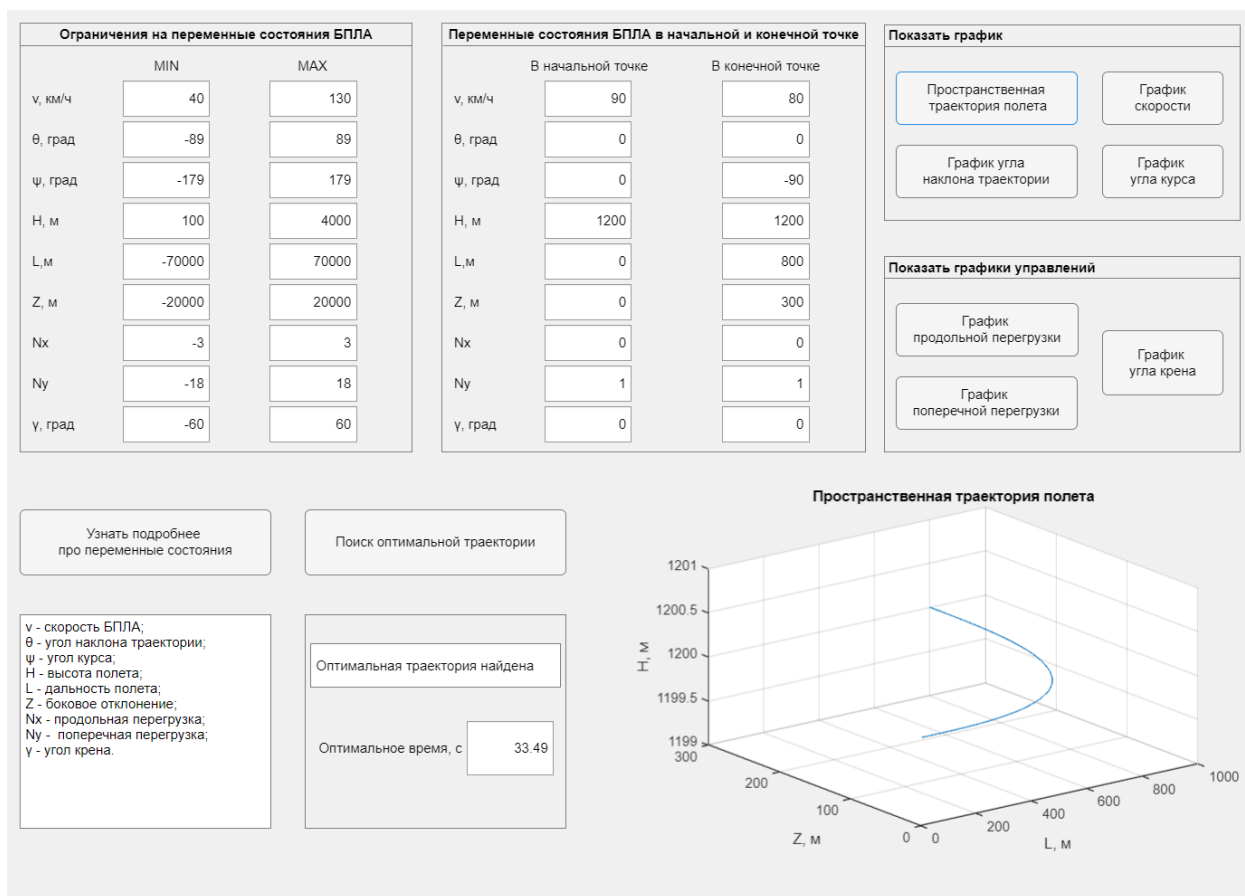


Рисунок 19 – Вид приложения с запущенным графическим окном

### 3.2 Тестирование работы программного комплекса в MATLAB

Для тестирования полученного программного комплекса в качестве ограничений для переменных состояния и управлений были взяты характеристики БПЛА самолетного типа Геоскан 101 Lite. Это БПЛА российского производства, который используется в строительной, геодезической и агро- сфере. Геоскан 101 Lite представлен на рисунке 20.



Рисунок 20 – Геоскан 101 Lite

Для данного БПЛА существуют следующие ограничения:

- протяженность маршрута до 70 км;
- минимальная и максимальная высота полета 100 м и 4000 м соответственно;
- максимальная скорость движения 130 км/ч;
- граничные условия продольной перегрузки  $\pm 3g$ ;
- граничные условия поперечной перегрузки  $\pm 18g$ , беспилотник испытывает перегрузки при взлёте и посадке в  $15G$ ;
- угол крена  $|\gamma| \leq 60^\circ$ , во время полёта если угол крена будет больше 60 градусов беспилотник автоматически выпустит парашют через 1.5 секунды;
- угол наклона траектории  $|\theta| < 90^\circ$
- угол курса  $|\psi| < 180^\circ$ ;
- ограничения на дальность полёта и боковое отклонение выбирается так, чтобы БПЛА имел запас расстояния для выполнения сложных и длинных манёвров, в данной работе дальность полета  $L$  принимается  $\pm 70$  км, боковое отклонение  $\pm 20$  км [9].

Разработанный программный комплекс был протестирован на трех маневрах: разворот БПЛА на  $90^\circ$ , набор высоты, уход от лобового столкновения.

### 1) Разворот БПЛА на $90^\circ$ .

Значения переменных состояния БПЛА в начальной и конечной точках траектории для данного маневра приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Переменные состояния БПЛА в начальной и конечной точках траектории при развороте на  $90^\circ$

	V, км/ч	$\vartheta$ , град	$\psi$ , град	H, м	L, м	Z, м	N <sub>x</sub>	N <sub>y</sub>	$\gamma$ , град
при t=0	100	0	0	1200	0	0	0	1	0
при t= $\Delta t$	90	0	-90	1200	600	250	0	1	0

Необходимое время для совершения маневра составляет 24,84 с.

Графики полетных характеристик и управлений при развороте БПЛА на  $90^\circ$  представлены ниже:

- пространственная траектория полета представлена на рисунке 21;
- график скорости БПЛА представлен на рисунке 22;
- график угла курса представлен на рисунке 23;
- график продольной перегрузки представлен на рисунке 24;
- график поперечной перегрузки представлен на рисунке 25;
- график угла крена представлен на рисунке 26.

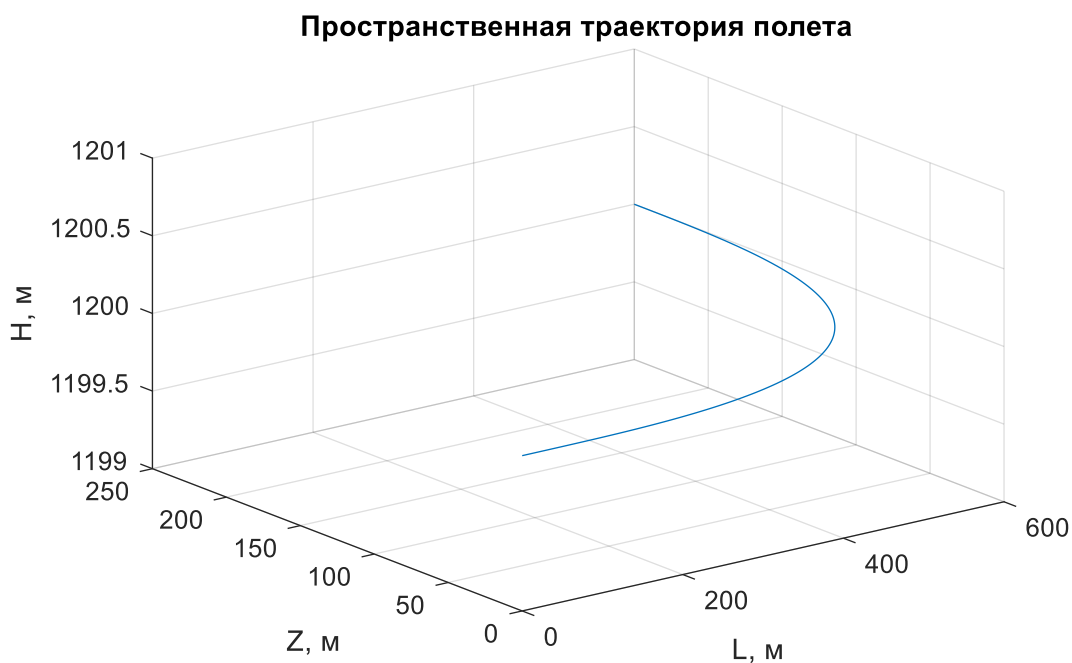


Рисунок 21 – Пространственная траектория полета при развороте БПЛА на  $90^\circ$

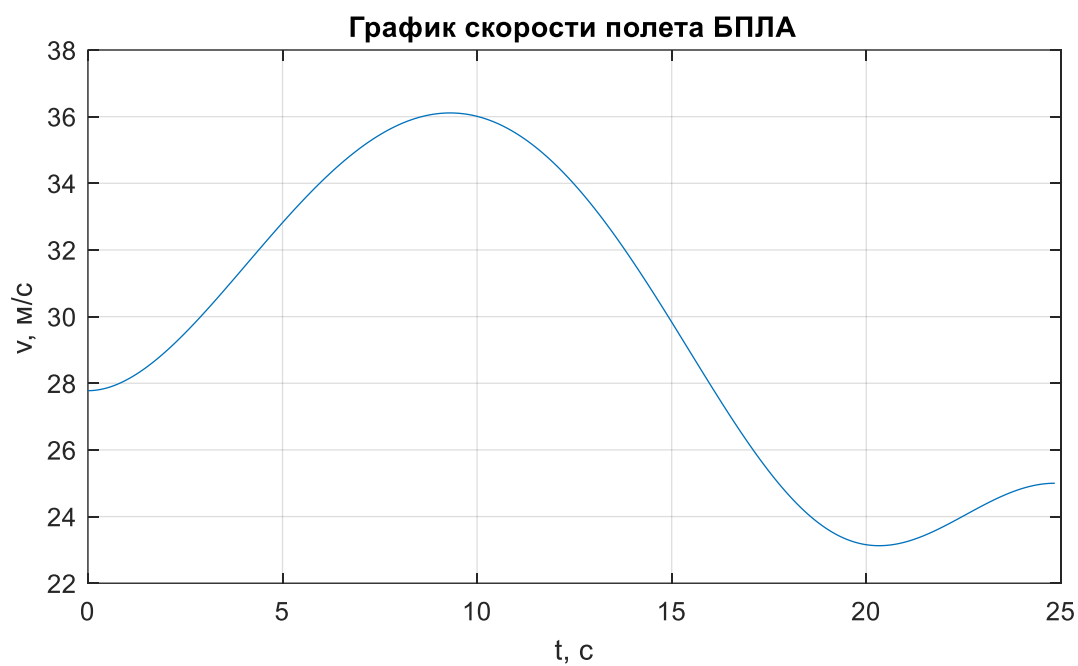


Рисунок 22 – График скорости БПЛА при развороте на  $90^\circ$

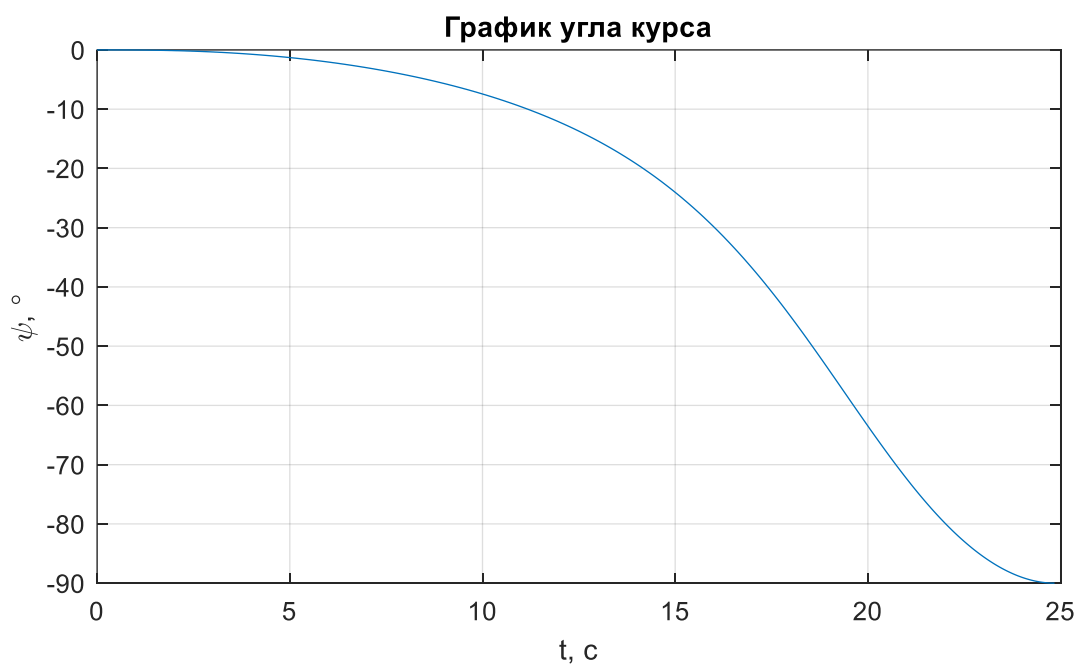


Рисунок 23 – График угла курса при развороте БПЛА на  $90^\circ$

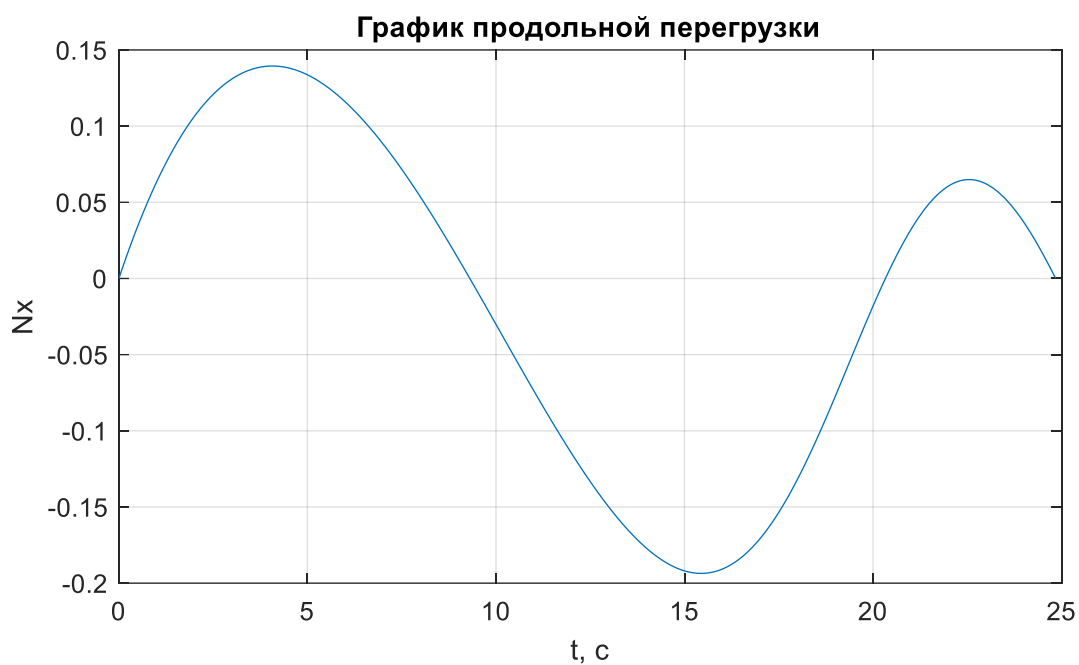


Рисунок 24 – График продольной перегрузки при развороте БПЛА на  $90^\circ$

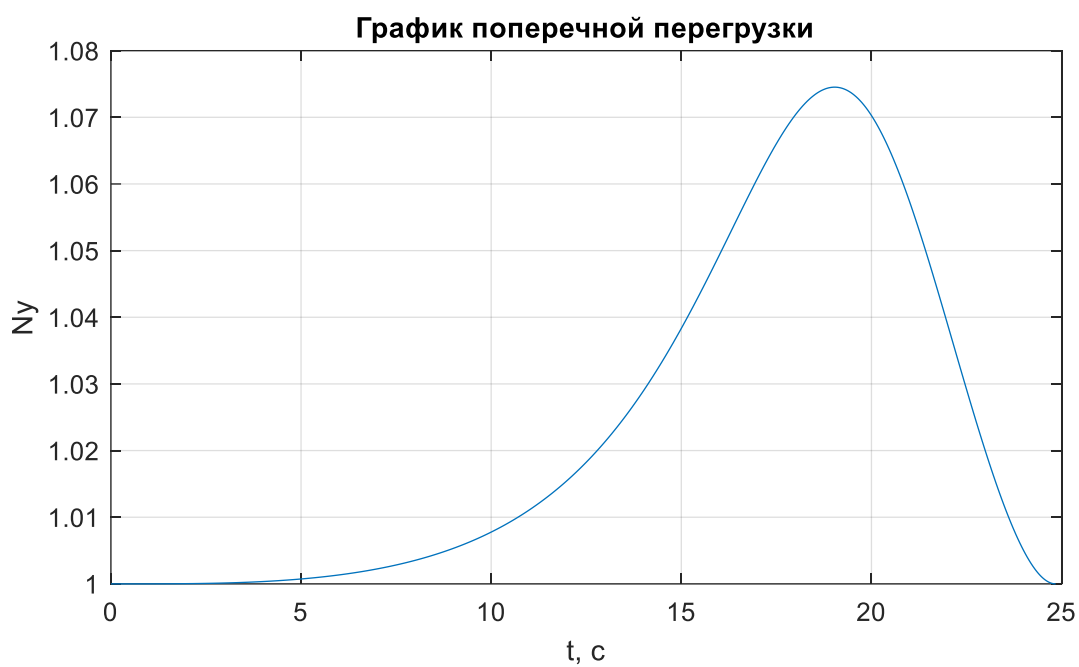


Рисунок 25 – График поперечной перегрузки при развороте БПЛА на  $90^\circ$



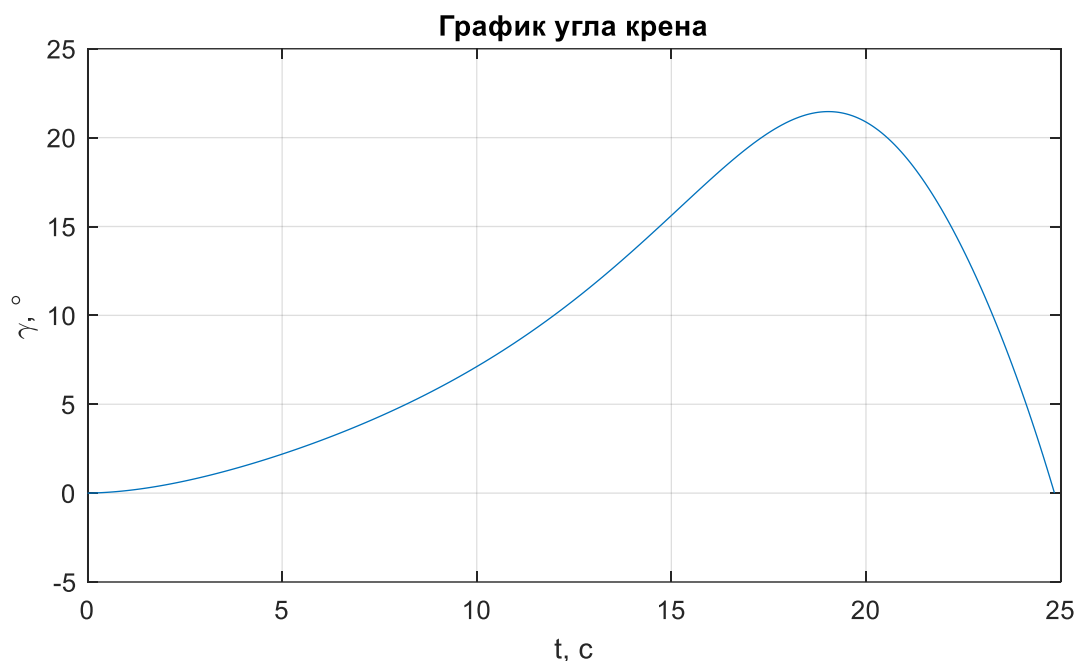


Рисунок 26 – График угла крена при развороте БПЛА на 90°

## 2) Набор высоты БПЛА.

Значения переменных состояния БПЛА в начальной и конечной точках траектории для данного маневра приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Переменные состояния БПЛА в начальной и конечной точках траектории при наборе высоты

	V, км/ч	θ, град	ψ, град	H, м	L, м	Z, м	N <sub>x</sub>	N <sub>y</sub>	γ, град
при t=0	100	0	0	800	0	0	0	1	0
при t=Δt	90	0	0	1700	1500	0	0	1	0

Необходимое время для совершения маневра составляет 60,86 с.

Графики полетных характеристик и управлений при наборе высоты БПЛА представлены ниже:

- пространственная траектория полета представлена на рисунке 27;
- график скорости БПЛА представлен на рисунке 28;
- график угла наклона траектории представлен на рисунке 29;
- график продольной перегрузки представлен на рисунке 30;

– график поперечной перегрузки представлен на рисунке 31.

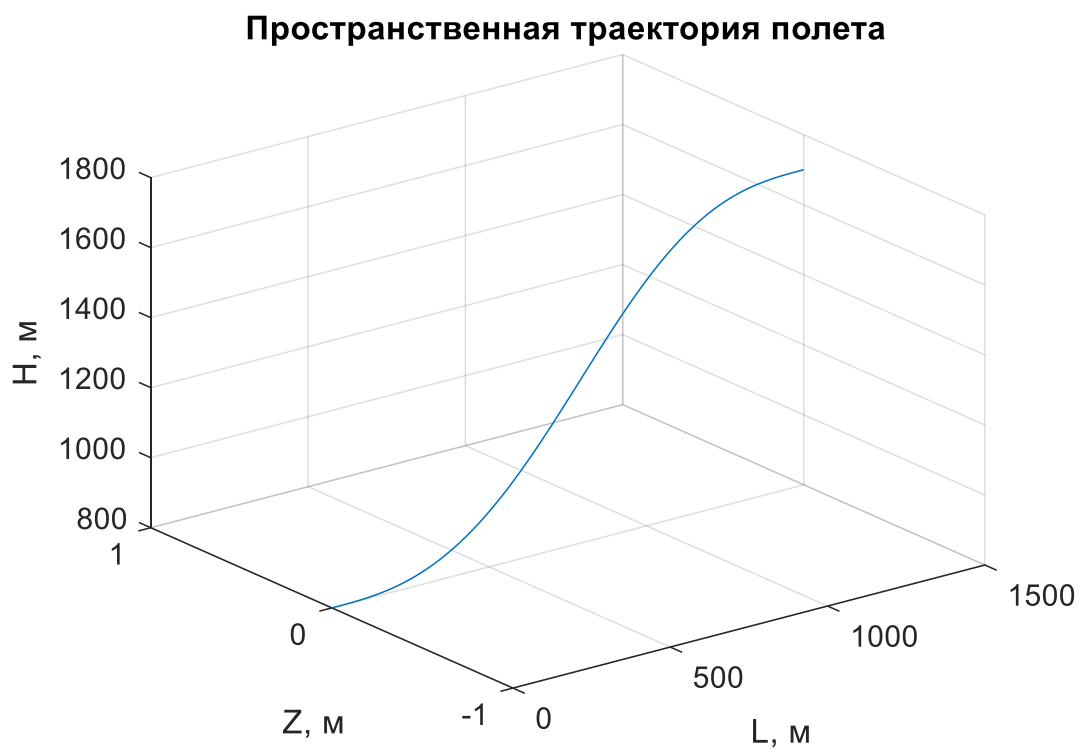


Рисунок 27 – Пространственная траектория полета при наборе высоты

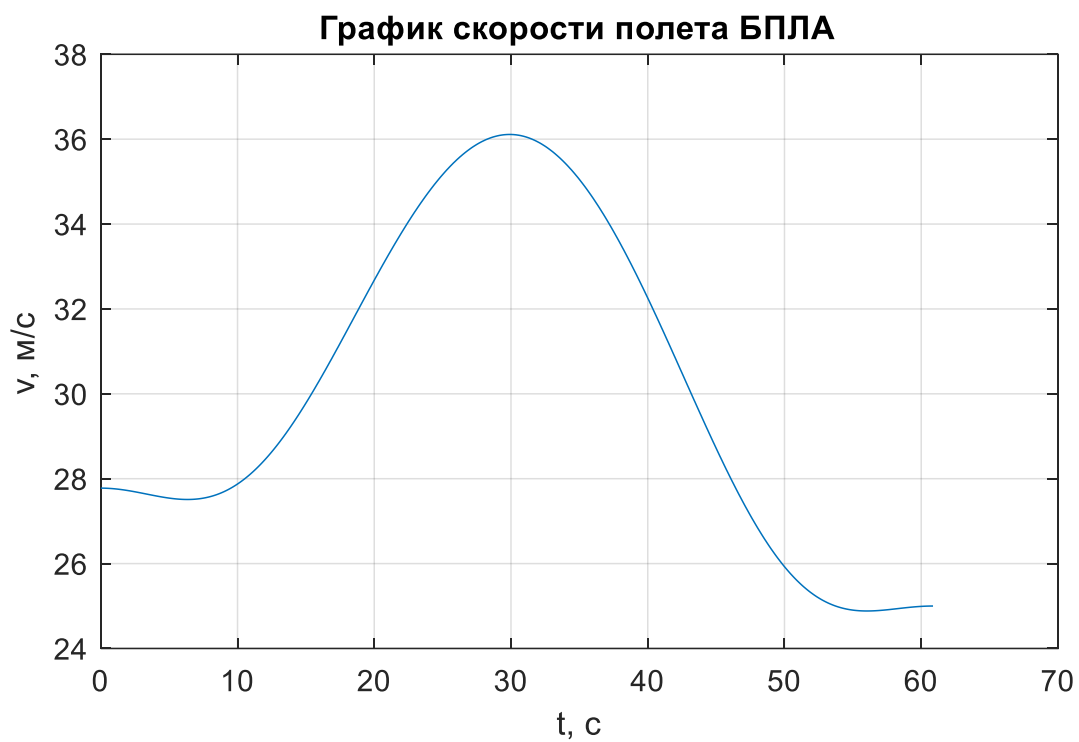


Рисунок 28 – График скорости БПЛА при наборе высоты

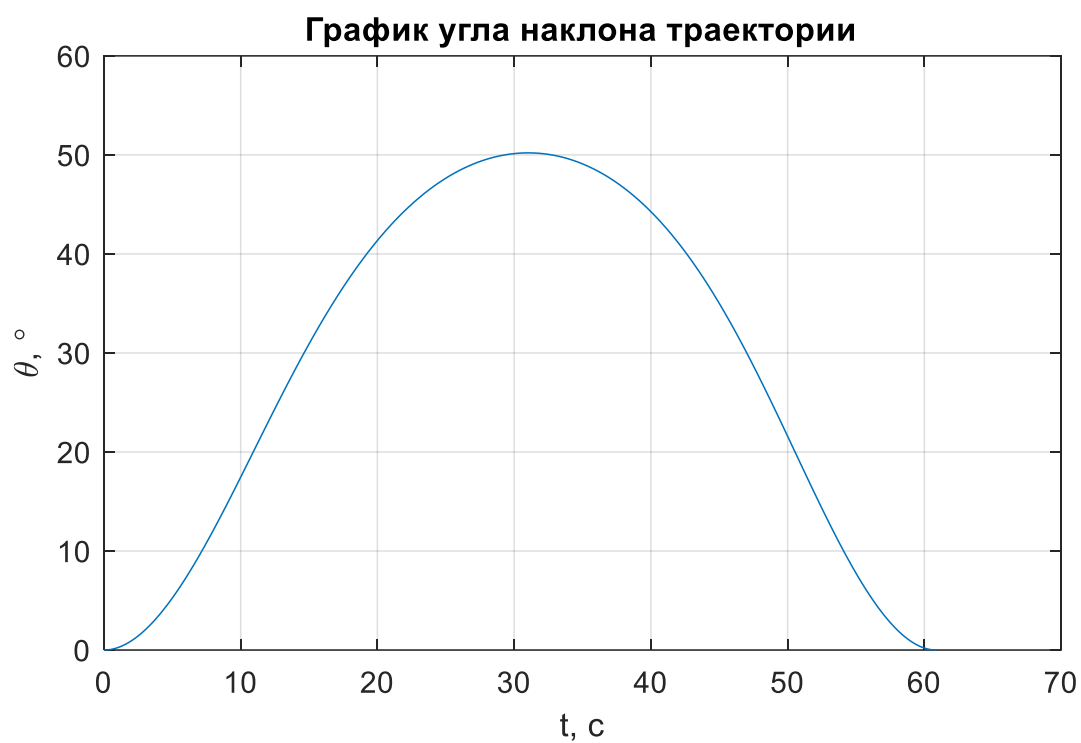


Рисунок 29 – График угла наклона траектории при наборе высоты

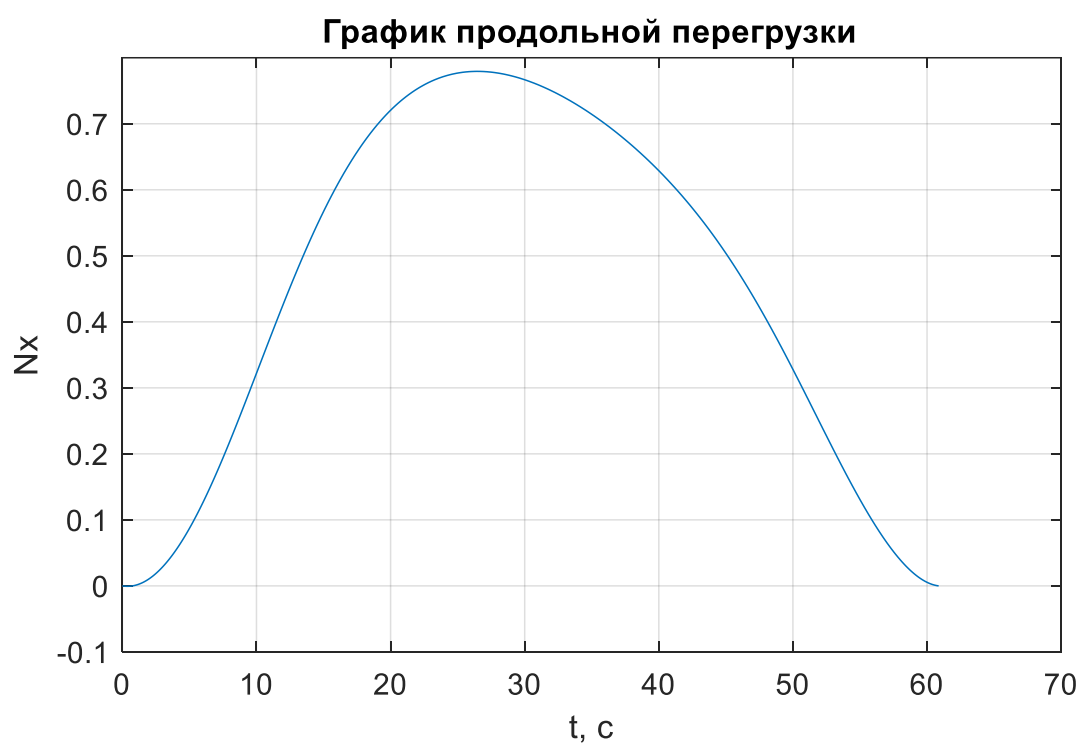


Рисунок 30 – График продольной перегрузки при наборе высоты

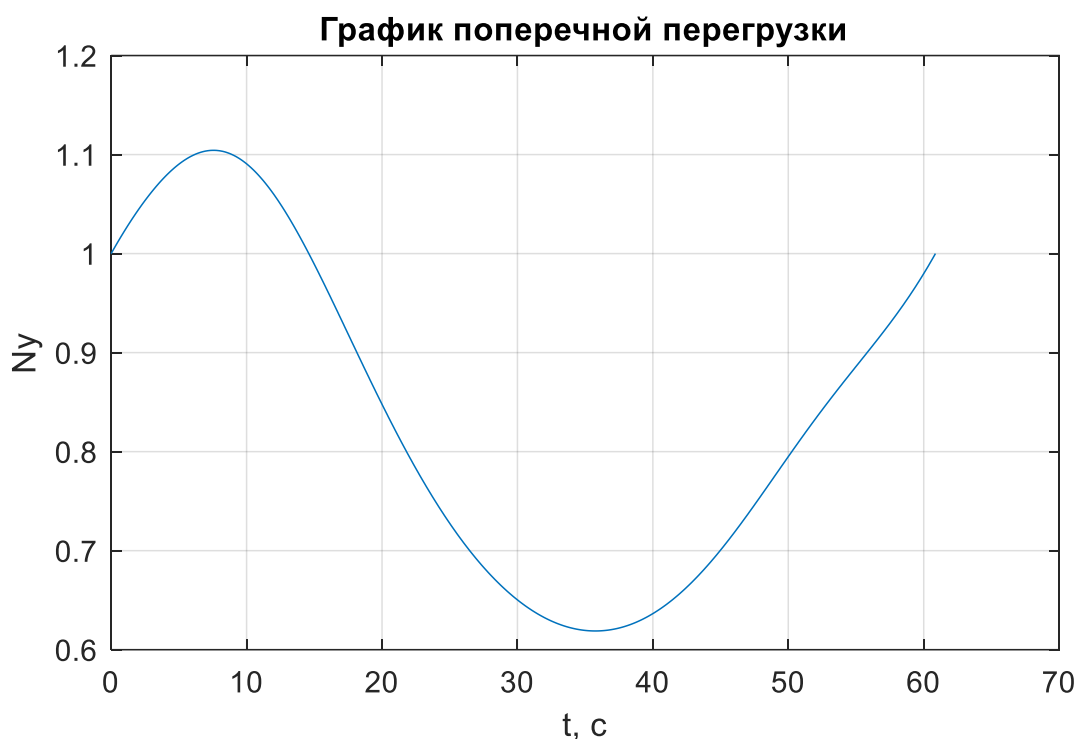


Рисунок 31 – График поперечной перегрузки при наборе высоты

### 3) Уход от лобового столкновения БПЛА.

Значения переменных состояния БПЛА в начальной и конечной точках траектории для данного маневра приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Переменные состояния БПЛА в начальной и конечной точках траектории при уходе от лобового столкновения

	V, км/ч	$\vartheta$ , град	$\psi$ , град	H, м	L, м	Z, м	Nx	Ny	$\gamma$ , град
при $t=0$	100	0	0	1500	0	0	0	1	0
при $t=\Delta t$	100	0	0	1500	300	250	0	1	0

Необходимое время для совершения маневра составляет 14,28 с.

Графики полетных характеристик и управлений при уходе от лобового столкновения БПЛА представлены ниже:

- пространственная траектория полета представлена на рисунке 32;
- график скорости БПЛА представлен на рисунке 33;
- график угла наклона траектории представлен на рисунке 34;
- график продольной перегрузки представлен на рисунке 35;

- график поперечной перегрузки представлен на рисунке 36;
- график угла крена представлен на рисунке 37.

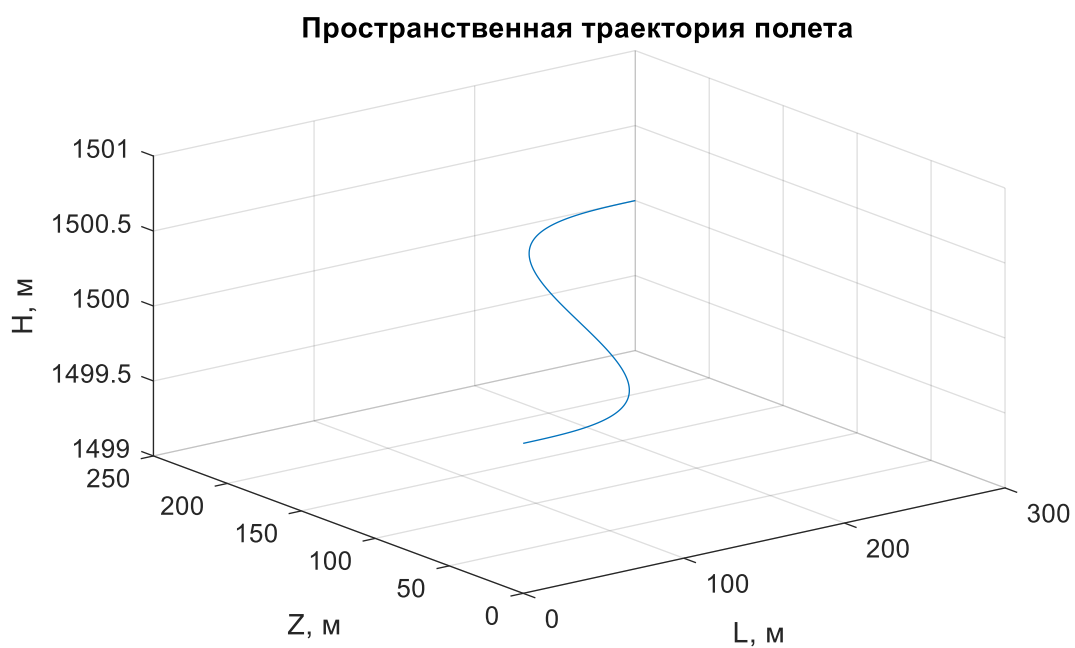


Рисунок 32 – Пространственная траектория полета при уходе от лобового столкновения

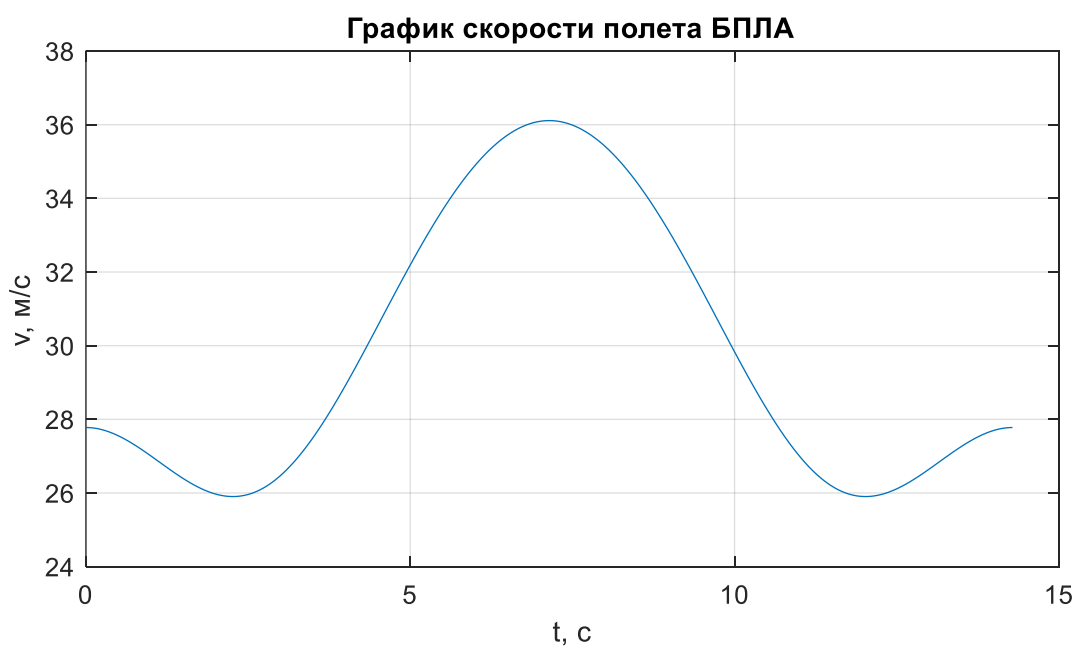


Рисунок 33 – График скорости БПЛА при уходе от лобового столкновения

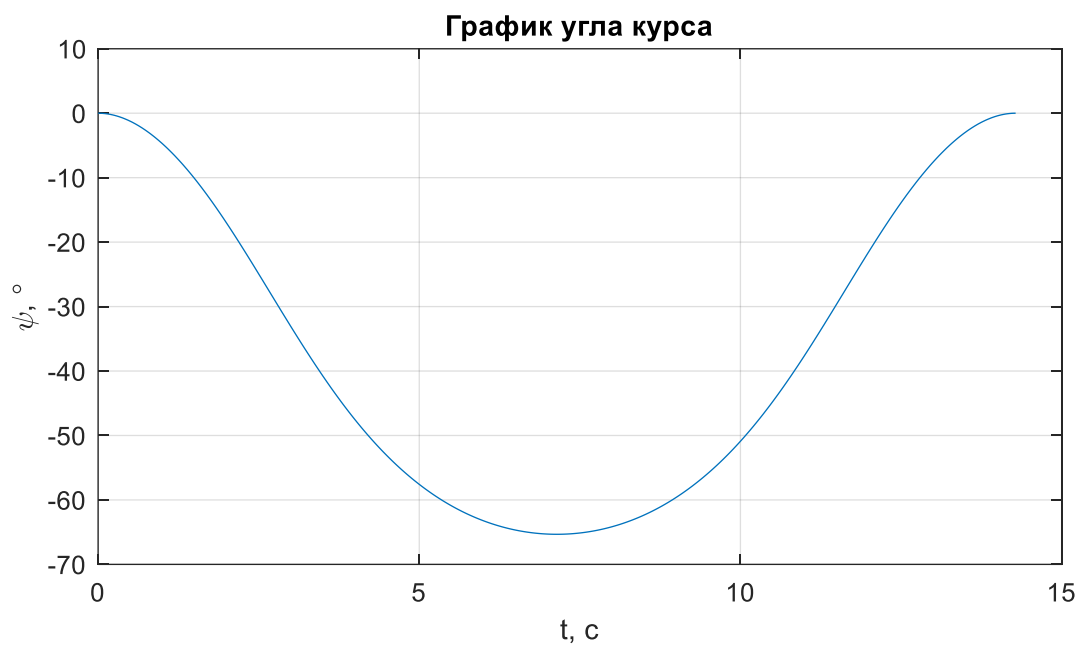


Рисунок 34 – График угла курса при уходе от лобового столкновения



Рисунок 35 – График продольной перегрузки при уходе от лобового столкновения

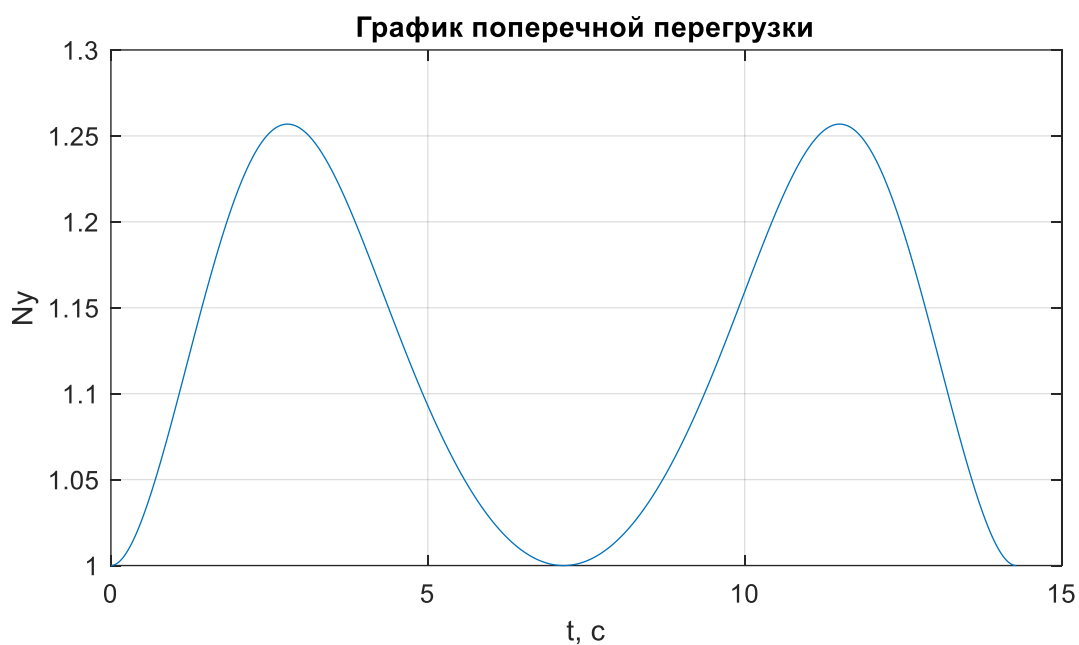


Рисунок 36 – График поперечной перегрузки при уходе от лобового столкновения

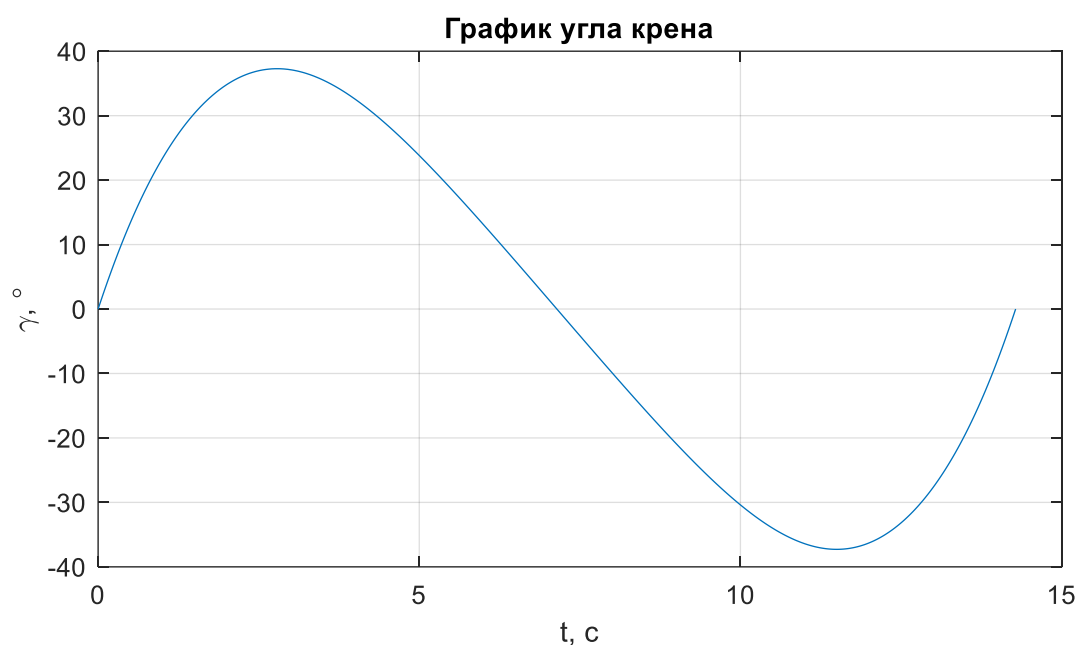


Рисунок 37 – График угла крена при уходе от лобового столкновения

Тестирование полученного программного комплекса показало, что при больших скоростях, оптимальное время для совершения маневра увеличивается. При изменении угла курса необходимо учитывать боковое смещение, иначе невозможно построить траекторию. Так, например, стоит учитывать направление курса и знак смещения, желательно чтобы они были

противоположными, и чтобы совершить маневр необходимо, чтобы боковое смещение было не сильно маленьким, и чтобы затрачивалось меньше времени, оно должно быть не сильно большим.

При автономной работе данного программного комплекса, задаются параметры БПЛА в данный момент, т.е. на наземную станцию управления эти параметры с помощью сигнала передаются от беспилотника. Можно сделать так, чтобы эти данные автоматически записывались в поля переменных состояний БПЛА в начальной точке, затем инженер в зависимости от задачи и от совершаемого маневра вносит параметры, которые должны быть в конечной точке траектории полета. Если программа находит траекторию, то определяет самый оптимальный по времени маршрут. В случае с БПЛА это скорее необходимость, т.к. длительность полета БПЛА составляет около 60 минут, здесь каждая секунда на счету. Таким образом приложение может использоваться для синтеза оптимальных траекторий движения БПЛА, причём в режиме реального времени.

Выводы: программный комплекс прошел успешные тестирования, обработка информации занимала доли секунды. Тестировалось приложение на трех основных маневрах: разворот на  $90^\circ$ , набор высоты и уход от лобового столкновения. Были получены соответствующие графики летных характеристик и характеристик управления. Если программа не находила траекторию по каким-либо причинам, то она завершала свою работу с сообщением о невозможности найти траекторию. Чаще всего это происходило из-за неправильно учтенных знаков переменных состояния, которые противоречили друг другу в совершаемом маневре.



#### 4 Безопасность жизнедеятельности

##### 1) Общие санитарно-гигиенические условия труда.

В перечень задач инженера-программиста входит обширный спектр действий, связанных с обработкой информации на компьютере, включающий работу с программным обеспечением.

Рабочее место инженера-программиста представляет собой светлое помещение, площадью  $15 \text{ м}^2$  ( $3 \text{ м} \times 5 \text{ м}$ ), высота потолков 3 м. Инженер сидит один в кабинете, поэтому объём помещения на одного человека составляет  $45 \text{ м}^3$ . Освещение помещения является комбинированным.

Специалист на работе подвержен следующим негативным факторам:

- повышенная нагрузка на зрительный анализатор: продолжительная работа с объектами различения малого размера, повышенная яркость цветового изображения;
- интеллектуальная нагрузка: необходимость быстрого принятия решений, творческая деятельность, постоянное восприятие и оценка новой информации, высокая степень сложности задания;
- эмоциональная нагрузка: степень ответственности за выполняемое задание, дефицит времени, значимость ошибки;
- монотонность трудового процесса: многократное повторение однообразных действий, длительностью сосредоточенного наблюдения;
- гиподинамия: длительное пребывание инженера-программиста в одной позе;
- повышенный уровень шума и вибраций: компьютер является источником различных механических колебаний и вибраций;
- повышенная запыленность, т.к. пыль электризуется и притягивается ко всей поверхности в пределах рабочей зоны;
- пониженная влажность воздуха: пользователь ПК вынужден дышать более горячим, сухим и пыльным воздухом;
- концентрация вредных веществ в воздухе;

- тепловыделения ЭВМ;
- электромагнитные излучения и электрические поля.

В рабочих помещениях необходимо поддерживать идеальный микроклимат, который состоит из нескольких ключевых параметров: температуры, относительной влажности и скорости потока воздуха. Организация комфортных условий для сотрудников важна для обеспечения высокой производительности и благоприятного рабочего настроения.

Согласно ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны», нормирование параметров микроклимата в рабочей зоне производится в зависимости от периода года, категории работ по уровню энергозатрат, наличия в помещении источников явного тепла.

Работу ПК можно квалифицировать, как физически легкую, так как данная работа проходит в сидячем положении и при этом не требует сильного физического напряжения. Данный вид работы относят к категории 1а. В таблице 4 приведены оптимальные параметры микроклимата для холодного и тёплого периодов года в соответствии с ГОСТ 12.1.005-88 и СанПиН 1.1.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредных для человека факторов среды обитания».

Таблица 4 – Оптимальные параметры микроклимата для холодного и тёплого периодов года

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Лёгкая 1а	22-24	21-25	40-60	0,1
Тёплый	Лёгкая 1а	23-25	22-26		

## 2) Система вентиляции.

По способу перемещения воздуха вентиляция бывает естественной и механической.

Согласно «СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» механическую вентиляцию следует предусматривать:

- если параметры микроклимата и качество воздуха не обеспечиваются естественной вентиляцией в течение года;
- для помещений без естественного проветривания.

В производственных помещениях объемом на каждого работающего не менее 40 м<sup>3</sup> допускается использовать периодическое проветривание через фрамуги и форточки.

В производственных помещениях объемом на каждого работающего не менее 40 м<sup>3</sup> следует проектировать подачу наружного воздуха механической вентиляцией:

- не менее 30 м<sup>3</sup>/ч с естественным проветриванием;
- не менее 60 м<sup>3</sup>/ч без естественного проветривания.

В рассматриваемом помещении нет источников выделения вредных веществ. Объем помещения на одного работающего составляет 45 м<sup>3</sup>. Поэтому в помещении допускается использовать периодически действующую естественную вентиляцию, но ее недостаточно, для обеспечения необходимого микроклимата. В этом случае устанавливается качественная система подачи и вывода воздуха, которая обеспечивает:

- постоянный приток свежего воздуха в требуемом объеме;
- удаление отработанного воздуха;
- фильтрацию воздуха как минимум от пыли и крупных загрязнений;
- комфортный уровень шума;
- возможность регулировать температуру поступающего воздуха во избежание сквозняков.

Расчёт необходимого воздухообмена для конкретно данного кабинета инженера-программиста представлен на рисунке 38 и составляет 60 м<sup>3</sup>/ч, соответственно кратность воздухообмена при объеме помещения 45 м<sup>3</sup> составит 1,5 раза в час.

Расчет по площади	
Площадь помещения:	15 м <sup>2</sup>
Плотность рассадки: м <sup>2</sup> на 1 чел	15 м <sup>2</sup> /чел.
Расход воздуха:	60 м <sup>3</sup> /ч (ø80, нагр≈0.9кВт, охл≈0.2кВт)

Рисунок 38 – Расчет воздухообмена в кабинете инженера-программиста

### 3) Система освещения.

Необходимую освещенность на рабочем месте в соответствии с СП 52.13330.2016 устанавливают в зависимости от:

- характера зрительной работы, контраста объекта с фоном и яркости фона;
- системы освещения.

Искусственное освещение по конструктивному исполнению может быть общим и комбинированным (совокупность общего и местного освещения).

Систему общего освещения применяют в помещениях, где по всей площади выполняются однотипные работы. Необходимая для выполнения работ освещенность создается на всей территории рабочей зоны.

Систему комбинированного освещения применяют при выполнении работ высокой точности.

При комбинированном освещении:

- общее освещение обеспечивает только отсутствие резких яркостных перепадов на территории рабочей зоны;
- с помощью местных светильников непосредственно на рабочем месте создается необходимая для выполнения работ освещенность.

Требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению рабочего места инженера-программиста приведены в таблице Б.1 в Приложении Б.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного освещения.

В соответствии с требованиями и площадью помещения произведен расчет осветительной установки.

Исходные данные для расчета представлены на рисунке 39

### Исходные данные

Параметры объекта	Значения
Размеры помещения (ДхШхВ), м	5 x 3 x 3
Высота расчетной плоскости, м	0.8
Заданный уровень освещенности, лк	750
Тип светильника	потолочный
Светильник	GALAD Кворум LED-35-D120-IP 20-УХЛ4(I/600x600/940/RAL901 6/PC.OP/AC230V/I/D/X/W/S/G1)

Рисунок 39 – Исходные данные для расчёта осветительной установки

Расположение лампочек в кабинете инженера-программиста представлено на рисунке 40.

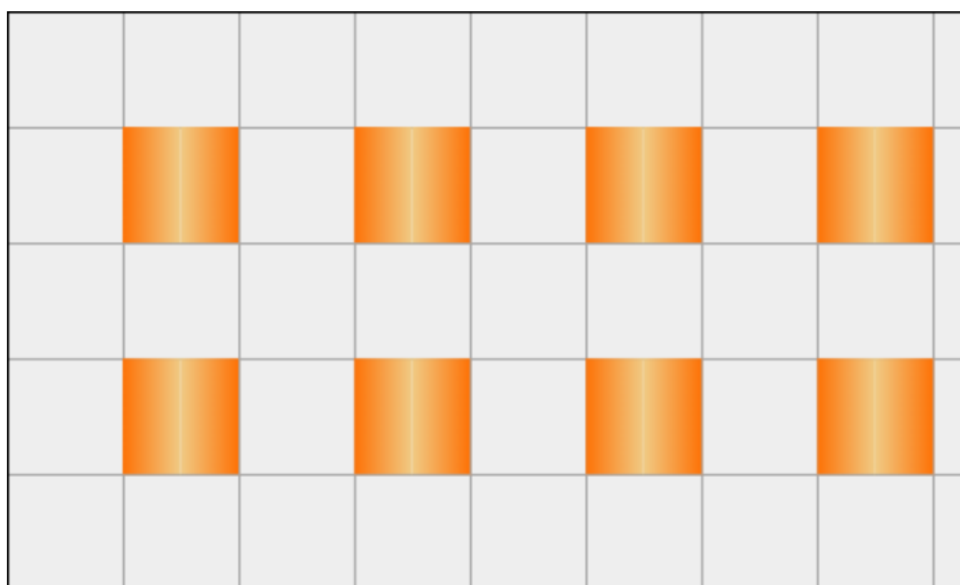


Рисунок 40 – Расположение лампочек в кабинете инженера-программиста

Характеристики выбранной лампочки GALAD Кворум LED-35-D120-IP20-УХЛ4 представлены в приложении В.

Результаты расчета осветительной установки представлены на рисунке 41

## Результаты расчета

Параметры	Значения
Количество светильников, шт.	8
Средняя освещенность, лк	946
Мин. освещенность (Е <sub>мин</sub> ), лк	605
Макс. Освещенность (Е <sub>макс</sub> ), лк	1184
Параметры	Значения
Равномерность (Е <sub>мин</sub> / Е <sub>ср</sub> )	0.64
Равномерность (Е <sub>мин</sub> / Е <sub>макс</sub> )	0.51
Коэффициент использования	0.62

График распределения освещенности в фиктивных цветах, лк

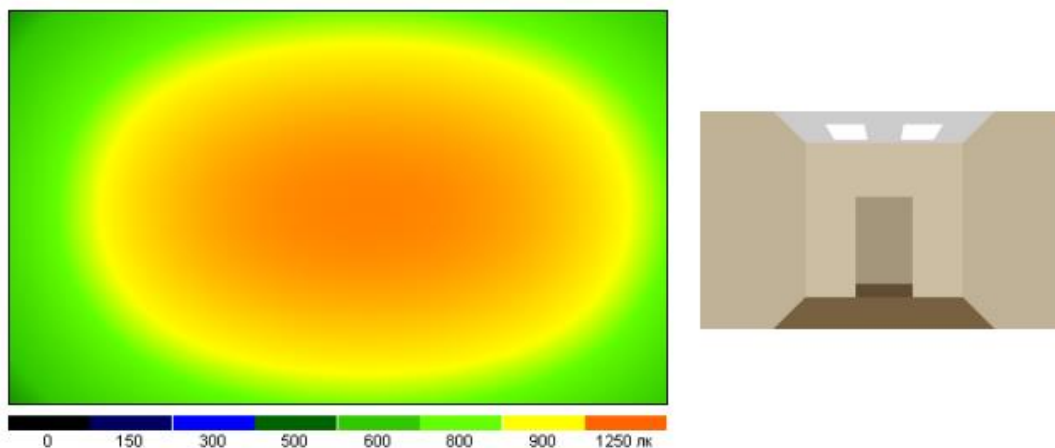


Рисунок 41 – Результаты расчета осветительной установки в кабинете инженера-программиста

### 4) Требования к шуму и вибрациям

В производственных помещениях при выполнении основных или вспомогательных работ с использованием ПЭВМ уровни шума на рабочих местах не должны превышать предельно допустимых значений,

установленных для данных видов работ в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами ГОСТ 23337 – 2014.

При выполнении работ с использованием ПЭВМ в производственных помещениях уровень вибрации не должен превышать допустимых значений вибрации для рабочих мест (категория 3, тип "в") в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами.

Печатающее оборудование, являющееся источником шума, следует устанавливать на звукопоглощающей поверхности автономного рабочего места пользователя. Если уровни шума от печатающего оборудования превышают нормируемые, оно должно быть расположено вне помещения с ПК. Помещения для выполнения основной работы с ПК не должны быть расположены рядом (смежно) с производственными помещениями с повышенным уровнем шума или рядом с серверными.

Желательно подбирать такую мебель в кабинет, которая бы снижала акустику в помещении, так, например, выбирать рабочее кресло с большой спинкой.

Если кабинет расположен так, что окно выходит на людную улицу, где ездит транспорт, то стоит ограничить открывания окна, чтобы избежать лишнего шума, это допустимо в случае с хорошей вентиляцией помещения.

Так же хорошим звуковым барьером будут плотные стены в офисе с хорошей шумоизоляцией. Большим плюсом будет, если в офисе есть зона отдыха, оборудованная шумоизоляцией, чтобы работник смог разгрузиться от вредного шума.

В некоторых офисах в туалете включают классическую музыку или звуки природы, которые тоже очень действенны против офисного шума и человек чувствует себя более спокойно и расслабленно при посещении туалета, что тоже не мало важно во время трудового процесса.

## 5) Требования к ЭМИ и ЭМП

Наиболее сильное воздействие на среду рабочей зоны компьютера и организм его пользователя может оказывать электромагнитное излучение,

которое имеет комплексный многофакторный характер, образуемый совокупностью излучений (или полей) от работы различных деталей компьютера (процессора, устройства визуального отображения информации или монитора (дисплея)), а также блоков бесперебойного электропитания, сетевых фильтров, а также электропроводки.

При работе с ПК в режиме текста уровень ЭМП от включенного компьютера соответствует норме. Увеличение напряженности поля происходит во время работы с графической информацией, особенно при повышении четкости изображения на экране монитора. В ряде случаев интенсивность ЭМП создается внешними источниками (элементами системы электроснабжения здания, трансформаторами, воздушными линиями электропередач и т.п.). В связи с этим при установке персонального компьютера на рабочем месте он должен быть правильно подключен к электропитанию и надежно заземлен.

Согласно ГОСТ 12.1.030-81 «ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление», защитному заземлению или занулению подлежат металлические нетоковедущие части оборудования, которые из-за неисправности изоляции могут оказаться под напряжением и к которым возможно прикосновение людей.

Периодичность проведения проверки сопротивления изоляции в офисе – один раз в три года, этого вполне достаточно, чтобы гарантировать безопасность персонала и сохранность имущества.

На рабочем месте инженера-программиста используется сеть 380/220 В. Нормы на сопротивление заземления и изоляции электрических цепей ЭВМ общего назначения для сети напряжением 380/220 В приведены в таблице 5 и 6 соответственно

Таблица 5 – Допустимые значения сопротивлений заземления для сети напряжением 380/220 В



Напряжение сети, В	Режим нейтрали	Назначение заземления	Сопротивление заземления, Ом	Примечание ГОСТ 12.1.030-81
380/220	Заземленная Трехфазная/однофазная	Рабочее (заземление нейтрали)	$R_p \leq 4$	$R_n \leq 30$

Таблица 6 – Сопротивление изоляции электрической цепи ЭВМ для сети напряжением 380/220 В

Климатические условия	Сопротивление изоляции, МОм
Нормальные	20
Повышенная температура ( $> 35^\circ$ )	5
Повышенная влажность ( $> 80\%$ )	1

#### 6) Пожарная безопасность на рабочем месте

Причинами возникновения пожара являются:

- Короткие замыкания. Они возникают из-за перенапряжений в сети, поврежденной изоляции. Особенно часто по этой причине пожары случаются в зданиях со старой проводкой или нарушениями правил ее эксплуатации.

- Использование неисправного электрооборудования. Выключатели, розетки, техника с поврежденной изоляцией или неисправные приборы – еще одна частая причина возгораний.

- Курение в неположенных местах.

- Неправильное обращение с оборудованием.

- Попадание солнечных лучей на легковоспламеняющиеся предметы.

Для офисного помещения лучше всего подойдет порошковая система пожаротушения. Порошок используется для тушения пожаров почти всех классов возгораний:

- обычные твердые материалы;

- жидкие горючие смеси (растворимые и не растворимые);

- газообразные;

- электрооснащение;

– с помощью огнетушащих порошков можно тушить металлы. Обычно применяют именно агрегатные АУПП с распределительными трубами, распылителями-успокоителями.

Огнетушащий порошок – это мелко измельченная минеральная соль (карбонат, бикарбонат, хлорид натрия или калия, а также другие химические соединения), в которую добавляют элементы, препятствующие слеживанию смеси и образованию комков.

При попадании смеси на очаг возгорания происходит нагрев и испарение определенного количества частиц порошка с образованием облака газа и плотной корки, что препятствует попаданию кислорода к очагу горения, вследствие чего пламя затухает. Кроме того, не испарившиеся частицы порошка образуют на поверхностях защитный слой.

Для предотвращения пожара на рабочем месте необходимо:

- регулярно проверять электропроводку и оборудование;
- использовать только исправное оборудование;
- соблюдать правила электробезопасности и пожаробезопасности.

В качестве первичных средств пожаротушения применяются:

- переносные и передвижные огнетушители;
- пожарные краны и средства обеспечения их использования;
- пожарный инвентарь;
- покрывала для изоляции очага возгорания;
- генераторные огнетушители аэрозольные переносные.

7) Мероприятия по организации труда и отдыха в течение рабочего дня

Для сохранения здоровья и обеспечения оптимальной работоспособности пользователей ЭВМ на протяжении рабочей смены должны устанавливаться регламентированные перерывы.

Для предупреждения преждевременной утомляемости у работающих с ПЭВМ, зрительного дискомфорта и других неблагоприятных субъективных ощущений, несмотря на соблюдение санитарно-гигиенических, эргономических требований, режимов труда и отдыха, следует применять

индивидуальный подход в ограничении времени работы с ПЭВМ, коррекцию длительности перерывов для отдыха или проводить смену деятельности на другую, не связанную с использованием ПЭВМ.

В случае, когда характер работы требует постоянного взаимодействия с ЭВМ (набор текстов, ввод данных и т.п.) и связан с напряжением внимания и сосредоточенностью, при исключении возможности периодического переключения на другие виды трудовой деятельности, не связанные с ЭВМ, рекомендуется организация перерывов на 10 — 15 минут через каждые 45 — 60 минут работы.

Во время регламентированных перерывов с целью снижения нервно-эмоционального напряжения, утомления зрительного анализатора, устранения влияния гиподинамии и гипокинезии, предотвращения развития позотонического утомления целесообразно выполнять комплексы упражнений. Кроме того, работающим с высоким уровнем напряженности во время регламентированных перерывов и в конце рабочего дня показана психологическая разгрузка в специально оборудованных помещениях (комната психологической разгрузки).

Помимо вышеперечисленного необходимо соблюдение еще ряда гигиенических требований при работе с компьютером:

- Расположение компьютера должно быть к окну боком, чтобы свет на него падал слева.
- При организации и оборудовании рабочего места при выборе мебели необходимо учитывать рост пользователя компьютера.
- Ежедневно перед началом работы необходимо убирать пыль на рабочем месте.
- Перед началом и по окончании работы, а также в обеденный перерыв рекомендуется проводить аэрацию (проветривание) кабинета.
- В кабинете необходимо проводить ежедневную влажную уборку.
- При работе с компьютером расстояние от глаз пользователя до монитора должно составлять 600-700 мм, но не менее 500 мм.

– Необходимо следить за осанкой: спина должна быть прямой, руки в локтях должны быть согнуты под прямым углом.

## 5 Оценка экономической эффективности

Спрос на БПЛА растет, в том числе расширяется российский рынок их производств. БПЛА начали применять в совершенно разных областях, в связи с этим возникает необходимость такого программного комплекса, который был бы доступен и понятен любому пользователю без технического образования. В данной дипломной работе разработано приложение с помощью App Designer в MATLAB, которое позволяет пользователю БПЛА строить и рассчитывать оптимальную траекторию полета, при этом можно проследить за всеми параметрами управления во времени. Данное приложение имеет простой интуитивно понятный и современный интерфейс, которое работает в режиме реального времени. Для работы с ним необходим установленный на ПК MATLAB. Данный программный комплекс применим ко всем беспилотникам самолетного типа, т.к. приложение позволяет подстраиваться под определенные характеристики БПЛА. Сейчас MATLAB доступен для бесплатного скачивания, чтобы пользоваться приложением по построению оптимальной траектории полета, нет необходимости в дополнительных библиотеках к MATLAB, поэтому будет достаточно 10 гб свободной памяти для установки.

Подобного программного комплекса на российском рынке нет, т.е. он уникален. Предполагается, что потенциальные потребители – это покупатели БПЛА, произведенные в России, поэтому реализация сбыта программного комплекса планируется через продавцов БПЛА. Таким образом, можно будет предлагать покупателям, за дополнительные 500 рублей приложение по нахождению оптимальной траектории полета.

### 1) Календарный план выполнения работы

Дипломная работа в себя включает следующие этапы:

- анализ ТЗ и работа с источниками;
- описание математической модели;
- разработка программного обеспечения;

- тестирование готового программного обеспечения;
- оформление пояснительной записки.

Продолжительность работ определяется с помощью экспертных оценок [10] по формуле (42):

$$t_j^0 = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5}, \quad (42)$$

где  $t_j^0$  – ожидаемая длительность j-й работы (час);

$t_{\min}$  и  $t_{\max}$  – наименьшая и наибольшая, по мнению эксперта, длительность работы (час).

В таблице 7 представлена упорядоченная последовательность действий и ожидаемая длительность каждого этапа работы.

Таблица 7 – Ожидаемая длительность j-й работы

№	Этап работы	Длительность работы, человека-час		
		$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_j^0$
1	Анализ ТЗ и работа с источниками	60	80	68
2	Описание математической модели	10	20	14
3	Разработка программного обеспечения	80	100	88
4	Тестирование готового программного обеспечения	5	10	7
5	Оформление пояснительной записки	100	120	108
ИТОГО:				285

Таким образом длительность разработки составит 72 человеко-дня с учетом того, что в проекте будут задействованы 2 человека и количество времени работы 4 часа в день. Так как в проекте учувствуют 2 человек, то

происходит некоторая оптимизация разделения труда (распараллеливание) и уменьшения времени разработки. Планирование разработки в виде диаграммы Ганта представлено на рисунке 42.

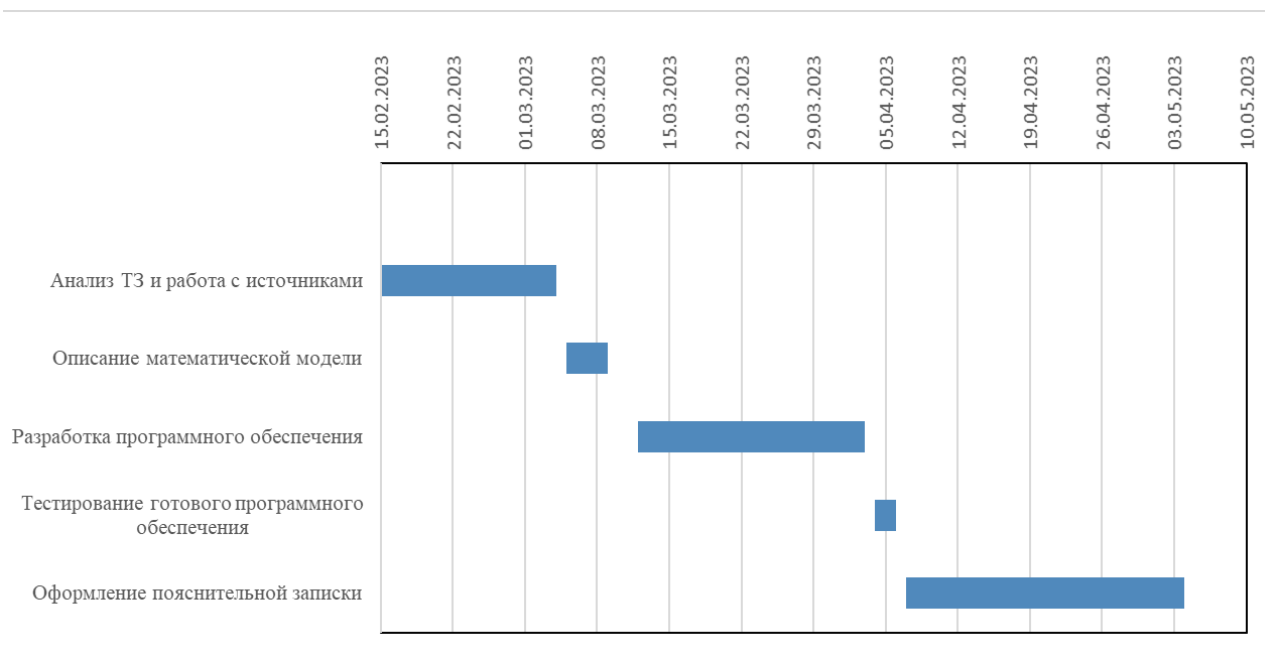


Рисунок 42 – Диаграмма Ганта

## 2) Расчет заработной платы исполнителей

Затраты на разработку устройства определяются исходя из издержек на оплату труда исполнителей разработки. Оплата труда исполнителей рассчитывается на основе трудоемкости выполненных работ.

Ставка заработной платы определяется за единицу времени (за час или день) исходя из месячной заработной платы соответствующего исполнителя. Для определения дневной ставки заработной платы необходимо разделить оклад за месяц на количество рабочих дней в месяце (21 рабочий день). Для определения часовой ставки заработной платы необходимо разделить оклад за месяц на количество рабочих часов в месяце ( $21 \text{ рабочий день} \cdot 8 \text{ часов} = 168 \text{ часов}$ ).

В составе группы по производству приемо-передающего модуля задействовано 2 человека: инженер и руководитель проекта. В среднем

инженер получает заработную плату 45 000 руб., руководитель проекта 80 000 руб., следовательно, часовая ставка рассчитывается согласно формуле (43):

$$S = \frac{B}{t}, \quad (43)$$

где  $S$  – часовая ставка сотрудника;

$B$  – средняя заработная плата сотрудника;

$t$  – количество рабочих часов.

Расчет ставки заработной платы представлен в таблице 8

Таблица 8 – Расчет ставки заработной

№	Этап работы	Трудоемкость исполнителя, час		Трудоемкость, $t_0$ , час	Ставка, руб./час
		Инженер	Руководитель		
1	Анализ ТЗ и работа с источниками	50	18	68	21 964 Р
2	Описание математической модели	12	2	14	4 167
3	Разработка программного обеспечения	80	8	88	25 238
4	Тестирование готового программного обеспечения	5	2	7	2 292
5	Оформление пояснительной записки	90	18	108	32 679
ИТОГО:		237	48	285	86 339

Общая ставка заработной платы составила 86339 рублей.



На основе данных о трудоемкости выполняемых работ и ставки (за день или час) соответствующих исполнителей необходимо определить расходы на заработную плату исполнителей и отчислений на страховые взносы на обязательное социальное, пенсионное и медицинское страхование.

Расходы на основную заработную плату исполнителей определяются согласно [10] формуле (44):

$$З_{\text{осн.з/пл}} = \sum_{i=1}^k T_i C_i, \quad (44)$$

где  $З_{\text{осн.з/пл}}$  – расходы на основную заработную плату исполнителей;

$k$  – количество исполнителей;

$T_i$  – время, затраченное  $i$ -м исполнителем на проведение исследования;

$C_i$  – ставка  $i$ -го исполнителя.

Следовательно:

$$З_{\text{осн.з/пл}} = \sum_{i=1}^2 237 \cdot 268 + 48 \cdot 476 = 86339 \text{руб.}$$

Расходы на дополнительную заработную плату исполнителей определяются по формуле (45):

$$З_{\text{доп.з/пл}} = З_{\text{осн.з/пл}} \cdot \frac{N_{\text{доп}}}{100}, \quad (45)$$

где  $N_{\text{доп}}$  – норматив дополнительной заработной платы.

При выполнении расчетов норматив дополнительной заработной платы необходимо принять равным 14% [10]. Соответственно, дополнительная заработная плата равняется:

$$З_{\text{доп.з/пл}} = 86339 \cdot \frac{14}{100} = 12087 \text{руб.}$$

### 3) Расчет отчислений на социальные нужды

Отчисления на страховые взносы на обязательное социальное, пенсионное и медицинское страхование с основной и дополнительной заработной платы исполнителей определяются [10] по формуле (46):

$$З_{\text{соц}} = (З_{\text{осн.з/пл}} + З_{\text{доп.з/пл}}) \cdot \frac{Н_{\text{соц}}}{100}, \quad (46)$$

где  $Н_{\text{соц}}$  – норматив отчислений на страховые взносы на обязательное социальное, пенсионное и медицинское страхование.

Норматив отчислений на страховые взносы на обязательное социальное, пенсионное и медицинское страхование составляет 30,2%. Следовательно:

$$З_{\text{соц}} = (86339 + 12087) \cdot \frac{30,2}{100} = 29725 \text{руб.}$$

### 4) Расчет затрат на содержание и эксплуатацию оборудования

На протяжении всей работы использовались два компьютера и один принтер, следовательно, необходимо рассчитать их затраты на потребляемую электроэнергию. Расчет производится согласно формуле (47):

$$З_{\text{э}} = t_0 \cdot L \cdot W, \quad (47)$$

где  $t_0$  – ожидаемая длительность всей работы;

$L$  – стоимость электроэнергии;

$W$  – величина, потребляемой мощности за час.

Общее время над дипломной работой составило 285 часов. Компьютер за час потребляет около 300 Вт, принтер – 100 Вт. Исполнитель использовал персональный компьютер в общей сложности около 237 часов, руководитель – 48 часов. Принтер использовался для печати в общей сложности около 3 часов.

Стоимость электроэнергии на период работы над дипломной работой составляет 5,70 руб./кВт·ч, согласно Распоряжению Комитета по тарифам Санкт-Петербурга от 18.11.2022 № 190-р. Тогда суммарные затраты потребляемой электроэнергии за период работы составят:

$$З_{э} = 237 \cdot 5,7 \cdot 0,3 + 48 \cdot 5,7 \cdot 0,3 + 3 \cdot 5,7 \cdot 0,1 = 489 \text{руб.}$$

#### 5) Расчет накладных и материальных расходов

Накладные расходы составляют 15% от суммы основной и дополнительной заработной платы и определяются согласно формуле (48):

$$C_{\text{нр}} = (З_{\text{осн.з/пл}} + З_{\text{доп.з/пл}}) \cdot 0,15. \quad (48)$$

Тогда:

$$C_{\text{нр}} = (86339 + 12087) \cdot 0,15 = 14764 \text{руб.}$$

Основные материальные расходы определяются с помощью таблицы 9.

Таблица 9 – Расчет материальных расходов

Наименование	Количество, шт.	Цена, руб.	Сумма, руб.
Бумага офисная	1	350	350
Чернила для принтера	1	1 500	1 500

Канцелярские товары	—	500	500
Пользовательский компьютер	1	80 000	80 000
Программное обеспечение Microsoft Office	1	1 500	1 500
Итого:			83 850
Транспортно-заготовительные расходы, 10%			8 385
Всего:			92 235

Согласно приведенной таблице 9 на материальные расходы необходимо выделить суммы в размере 92 235 рублей.

#### 6) Расчет себестоимости разработки программного комплекса

Калькуляция себестоимости разработки представлена в таблице 10.

Таблица 10 – Себестоимость разработки программного комплекса

№	Название статьи	Сумма, руб.
1	Расходы на оплату труда	86 339
2	Отчисления на социальные нужды	29 725
3	Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	489
4	Накладные расходы	14 764
5	Материальные расходы	92 235
Итоговая сумма затрат:		223 552

#### 7) Прогноз потоков денежных средств

Общая сумма инвестиционных затрат составит:

$$\text{ИЗ} = 223\,552 + 23\,473 = 247\,025$$

Если предположить, что жизненный цикл товара составит 3 года и за этот срок стоимость инвестиционных затрат в основной капитал должна быть возмещена для инвесторов, то годовые амортизационные отчисления составят 74 517 руб./год при равномерной амортизации. Таким образом, укрупненный прогноз потоков денежных средств представлен в таблице 11.

Таблица 11 – Укрупненный прогноз потоков денежных средств

Показатели, тыс.руб.	Интервал планирования, год			
	0	1	2	3
Годовой объем продаж		1250	1250	1250
Инвестиционные затраты	-247,03			
Годовые инвестиционные расходы		-915	-915	-915
Валовая прибыль		335	335	335
Налог на прибыль		-67	-67	-67
Чистая прибыль		268	268	268
Амортизация		74,5	74,5	74,5
Чистый поток денежных средств	-247,03	342,5	342,5	342,5
Дисконтный множитель	1	0,91	0,83	0,75
Приведенный чистый поток денежных средств	-247,03	311,68	284,28	256,88
Чистая приведенная стоимость будущих потоков денежных средств NPV	-247,03	64,65	348,92	605,80

Годовой объем продаж можно примерно считать таким: если в России в среднем покупают около 5 тысяч БПЛА самолетного типа в год, половина из этих покупателей решит приобрести дополнительно данный программный продукт стоимостью в 500 рублей, то объем продаж составит 1250 тыс.руб.

Для того, чтобы учесть разную ценность денег во времени, все вложения и доходы нужно привести к году финансирования. Приведение стоимостных величин осуществляется путем умножения их на коэффициент

дисконтирования. Для каждого года существует свой коэффициент дисконтирования, который определяется [11] по формуле (49):

$$v_i^t = \frac{1}{(1+i)^{t-1}}, \quad (49)$$

где  $i$  – ставка сравнения (темпы изменения ценности денег);

$t$  – порядковый номер года (первым годом считается год начала финансирования).

Дисконтирование производится при  $i=10\%$ .

Из данной таблицы следует, что проект выходит на положительную величину NPV уже в первом году. За срок жизненного цикла, равный 3 годам, значение NPV составит 605,8 тыс. руб., что свидетельствует об экономической целесообразности созданного программного продукта.

Для оценки экономической эффективности были рассчитаны расходы на оплату труда, отчисления на социальные нужды, расходы на содержание и эксплуатацию оборудования, накладные расходы и материальные расходы, итоговая сумма затрат вышла 223 552 рубля, это и составило себестоимость программного продукта. С помощью укрупненного прогноза потока денежных средств было вычислено, что уже в первый год все инвестиционные затраты окупятся и разработанное приложение принесет прибыль в виде 64,65 тысяч рублей уже в первый год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе разработан программный комплекс для реализации наиболее благоприятной пространственной траектории БПЛА. В процессе выполнения дипломной работы была охарактеризована математическая модель управляемого движения беспилотника. Для построения траектории движения была рассмотрена задача терминального управления. Также были представлены уравнения вычисления соответствующих траекторий управлений.

Для того, чтобы проложить траекторию движения БПЛА и решить поставленную задачу, был разработан и реализован программный комплекс в App Designer MATLAB. С помощью данного пакета можно использовать алгоритм поиска оптимальной по времени траектории и осуществить её управление. Разработанный интерфейс удобен для пользователя, понятен и прост в применении. Произведено тестирование приложения для различных маневров, в результате которого были рассчитаны оптимальные по времени траектории и построены соответствующие графики. Программный комплекс показал себя эффективным и быстрым в работе, что позволяет его использовать в режиме реального времени.

Полученные результаты могут быть использованы для исследования летных характеристик БПЛА. Также они могут применяться для создания полетного маршрута, который бы включал основные точки полета, но при этом занимал наименьшее количество времени. Еще могут быть использованы в экстренных ситуациях, когда принимается решение быстро совершить маневр, чтобы срочно сесть или увернуться от столкновения. По происшествии времени данный программный комплекс может быть оптимизирован с помощью внедрения новых функций управления с обратными связями, а также функций построения сложных траекторий, которые состоят из базовых манёвров и др.

Данный программный комплекс показал свою экономическую эффективность. Так при продвижении данного продукта полная себестоимость окупается в первый год. А за три года показатель NPV достигает 605 тысяч рублей.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Лямин А. Н., Нечаев Р.А., Шведов А.В., Перепелицин А.В., Самарцева А. П., Беляев А.Б. Методические указания к мульти-видео курсу «Мультироторный беспилотник своими руками» проекта «Универсариум» дополнительного образования детей научнотехнической направленности. - Москва: МАТИ, ЦТПО, 2014. - 101 с.

2 Канатников А.Н. Построение траектории летательных аппаратов с немонотонным изменением энергии // Наука и Образование. - 2013. - №ФС77-48211. - С. 107-122.

3 Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. - Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. - 768 с.

4 Касаткина Т.С. Преобразование аффинных систем к каноническому виду с использованием замен независимой переменной // Наука и образование. - 2013. - №ФС77-48211. - С. 285-298.

5 Исмаилов К.К. Определение аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата самолетного типа аналитическими методами // Вестник томского государственного университета. - 2022. - №78. - С. 112-124.

6 Лысухо Г.В., Масленников А.Л. Квадрокоптер: динамика и управление // Политехнический молодежный журнал. - 2020. - №5. - С. 1-14.

7 Булат П.В., Дудников С.Ю., Кузнецов П.Н. Основы аэродинамики беспилотных воздушных судов: Учебное пособие. - Москва: Спутник +, 2021. - 273 с.

8 Распопов В.Я. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов. - Москва: Машиностроение, 2011. - 184 с.

9 Геоскан Lite (Геоскан 101) // ГК "Геоскан" URL: <https://www.geoscan.aero/ru> (дата обращения: 25.04.2023).

10 Алексеева О.Г. Выполнение дополнительного раздела ВКР бакалаврами технических направлений. - Санкт-Петербург: СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2018. - 16 с.

11 Золотухин О.И. Финансово-экономические аспекты подготовки бизнес-плана. - 3-е изд. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургская государственная академия аэрокосмического приборостроения, 1994. - 45 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Код функции «otimal\_trajectoryButtonPushed»

```
function otimal_trajectoryButtonPushed(app, event)
    cla(app.axes,'reset');
    app.axes.Visible = "off";
    Time_0 = sqrt((app.H_Fin.Value-app.H_0.Value)^2+(app.L_Fin.Value-app.L_0.Value)^2+...
        (app.Z_Fin.Value-app.Z_0.Value)^2)/(app.v_MAX.Value/3.6);
    Time_Fin = (Time_0+5)*15;
    deltaTime = 0.5;
    precision = 0.0001;
    flagFound = false;
    flagTimeout = false;
    curTime = Time_0;
    g = 9.80665;
    trueVector = true(1, 1001);
    % STAR VIRTUAL CONTROL
    v0 = [app.Nx_0.Value
        app.Ny_0.Value*cosd(app.gamma_0.Value)
        app.Ny_0.Value*sind(app.gamma_0.Value)];
    % FINAL VIRTUAL CONTROL
    vF = [app.Nx_Fin.Value
        app.Ny_Fin.Value*cosd(app.gamma_Fin.Value)
        app.Ny_Fin.Value*sind(app.gamma_Fin.Value)];
    % SPEED INTO METERS PER SECOND
    v_0s = app.v_0.Value/3.6;
    v_Fins = app.v_Fin.Value/3.6;
    % START CONDITION IN NEW TERMS
    y10 = app.H_0.Value;
    y20 = app.L_0.Value;
    y30 = app.Z_0.Value;
    y10f = v_0s*sind(app.theta_0.Value);
    y20f = v_0s*cosd(app.theta_0.Value)*cosd(app.psi_0.Value);
    y30f = -1*v_0s*cosd(app.theta_0.Value)*sind(app.psi_0.Value);
    y10s = -g+g*v0(1)*sind(app.theta_0.Value)+g*v0(2)*cosd(app.theta_0.Value);
    y20s = g*v0(1)*cosd(app.theta_0.Value)*cosd(app.psi_0.Value)-...
        g*v0(2)*sind(app.theta_0.Value)*cosd(app.psi_0.Value)+...
        g*v0(3)*sind(app.psi_0.Value);
    y30s = -g*v0(1)*cosd(app.theta_0.Value)*sind(app.psi_0.Value)+...
        g*v0(2)*sind(app.theta_0.Value)*sind(app.psi_0.Value)+...
        g*v0(3)*cosd(app.psi_0.Value);
    % FINAL CONDITION IN NEW TERMS
    y1F = app.H_Fin.Value;
    y2F = app.L_Fin.Value;
    y3F = app.Z_Fin.Value;
    y1Ff = v_Fins*sind(app.theta_Fin.Value);
    y2Ff = v_Fins*cosd(app.theta_Fin.Value)*cosd(app.psi_Fin.Value);
    y3Ff = -1*v_Fins*cosd(app.theta_Fin.Value)*sind(app.psi_Fin.Value);
    y1Fs = -g+g*vF(1)*sind(app.theta_Fin.Value)+g*vF(2)*cosd(app.theta_Fin.Value);
    y2Fs = g*vF(1)*cosd(app.theta_Fin.Value)*cosd(app.psi_Fin.Value)-...
        g*vF(2)*sind(app.theta_Fin.Value)*cosd(app.psi_Fin.Value)+...
        g*vF(3)*sind(app.psi_Fin.Value);
    y3Fs = -g*vF(1)*cosd(app.theta_Fin.Value)*sind(app.psi_Fin.Value)+...
```

```

g*vF(2)*sind(app.theta_Fin.Value)*sind(app.psi_Fin.Value)+...
g*vF(3)*cosd(app.psi_Fin.Value);
while ((not(flagFound))&&(curTime<=Time_Fin))
    app.t = 0:curTime/1000:curTime;
    time = app.t;
    delta = curTime;
% FINDING COEFFICIENTS OF POLINOMIAL
    A = [delta^3 delta^4 delta^5;
        3*delta^2 4*delta^3 5*delta^4;
        6*delta 12*delta^2 20*delta^3];
    B1 = [y1F-y10-delta*y10f-0.5*delta^2*y10s;
        y1Ff-y10f-delta*y10s;
        y1Fs-y10s];
    B2 = [y2F-y20-delta*y20f-0.5*delta^2*y20s;
        y2Ff-y20f-delta*y20s;
        y2Fs-y20s];
    B3 = [y3F-y30-delta*y30f-0.5*delta^2*y30s;
        y3Ff-y30f-delta*y30s;
        y3Fs-y30s];
    C1 = linsolve(A,B1)';
    C2 = linsolve(A,B2)';
    C3 = linsolve(A,B3)';
% BUILDING A TRAJECTORY
    app.H = y10+y10f*time+0.5*y10s*time.^2+C1(1)*time.^3+C1(2)*time.^4+C1(3)*time.^5;
    app.L = y20+y20f*time+0.5*y20s*time.^2+C2(1)*time.^3+C2(2)*time.^4+C2(3)*time.^5;
    app.Z = y30+y30f*time+0.5*y30s*time.^2+C3(1)*time.^3+C3(2)*time.^4+C3(3)*time.^5;
% CALCULATING OTHER POLYNOMIALS
    app.v = sqrt((y10f+y10s*time+3*C1(1)*time.^2+4*C1(2)*time.^3+5*C1(3)*time.^4).^2+...
        (y20f+y20s*time+3*C2(1)*time.^2+4*C2(2)*time.^3+5*C2(3)*time.^4).^2+...
        (y30f+y30s*time+3*C3(1)*time.^2+4*C3(2)*time.^3+5*C3(3)*time.^4).^2);
    sinTheta = (y10f+y10s*time+3*C1(1)*time.^2+4*C1(2)*time.^3+5*C1(3)*time.^4)./app.v;
    app.theta = asind(sinTheta);
    cosTheta = cosd(app.theta);
    sinPsi = -(y30f+y30s*time+3*C3(1)*time.^2+4*C3(2)*time.^3+...
        5*C3(3)*time.^4)./sqrt((y20f+y20s*time+3*C2(1)*time.^2+4*C2(2)*time.^3+...
        5*C2(3)*time.^4).^2+(y30f+y30s*time+3*C3(1)*time.^2+4*C3(2)*time.^3+...
        5*C3(3)*time.^4).^2);
    cosPsi = (y20f+y20s*time+3*C2(1)*time.^2+4*C2(2)*time.^3+...
        5*C2(3)*time.^4)./sqrt((y20f+y20s*time+3*C2(1)*time.^2+4*C2(2)*time.^3+...
        5*C2(3)*time.^4).^2+(y30f+y30s*time+3*C3(1)*time.^2+4*C3(2)*time.^3+...
        5*C3(3)*time.^4).^2);
    app.psy = atan2d(sinPsi, cosPsi);
    v1 = ((y10s+6*C1(1)*time+12*C1(2)*time.^2+20*C1(3)*time.^3+g).*sinTheta+...
        (y20s+6*C2(1)*time+12*C2(2)*time.^2+20*C2(3)*time.^3).*cosTheta.*cosPsi-...
        (y30s+6*C3(1)*time+12*C3(2)*time.^2+20*C3(3)*time.^3).*cosTheta.*sinPsi)/g;
    v2 = ((y10s+6*C1(1)*time+12*C1(2)*time.^2+20*C1(3)*time.^3+g).*cosTheta+...
        (y20s+6*C2(1)*time+12*C2(2)*time.^2+20*C2(3)*time.^3).*sinTheta.*cosPsi+...
        (y30s+6*C3(1)*time+12*C3(2)*time.^2+20*C3(3)*time.^3).*sinTheta.*sinPsi)/g;
    v3 = ((y20s+6*C2(1)*time+12*C2(2)*time.^2+20*C2(3)*time.^3).*sinPsi+...
        (y30s+6*C3(1)*time+12*C3(2)*time.^2+20*C3(3)*time.^3).*cosPsi)/g;
    tanGamma = v3./v2;
    app.gama = atand(tanGamma);
    cosGamma=cosd(app.gama);
    app.Nx = v1;
    app.Ny = v2./cosGamma;
% CONVERTING SPEED BACK INTO KM/H

```

```

vh = app.v*3.6;
if isequal((vh>=app.v_MIN.Value)&(vh<=app.v_MAX.Value)&(app.theta>=...
    app.theta_MIN.Value)&(app.theta<=app.theta_MAX.Value)&(app.psy>= ...
    app.psi_MIN.Value)&(app.psy<=app.psi_MAX.Value)&(app.H>=...
    app.H_MIN.Value)&(app.H<=app.H_MAX.Value)&(app.L>=...
    app.L_MIN.Value)&(app.L<=app.L_MAX.Value)&(app.Z>=...
    app.Z_MIN.Value)&(app.Z<=app.Z_MAX.Value)&(app.Nx>=...
    app.Nx_MIN.Value)&(app.Nx<=app.Nx_MAX.Value)&(app.Ny>=...
    app.Ny_MIN.Value)&(app.Ny<=app.Ny_MAX.Value)&(app.gama>=...
    app.gamma_MIN.Value)&(app.gama<=app.gamma_MAX.Value), trueVector)

    if(deltaTime>=2*precision)
        curTime = curTime-deltaTime;
        deltaTime = deltaTime/2;
    elseif(deltaTime>precision)
        curTime = curTime-deltaTime;
        deltaTime = precision;
    else
        flagFound = true;
    end
else
    curTime = curTime+deltaTime;
end
end
if(curTime>Time_Fin)
    flagTimeout = true;
end
if flagTimeout == false
    app.find.Value = 'Оптимальная траектория найдена';
    app.optimal_time.Value = curTime;
else
    app.find.Value = 'Невозможно найти траекторию';
    app.optimal_time.Value = 0;
end
if flagTimeout == false
    app.Panel_5.Visible = "on";
    app.Panel_4.Visible= "on";
else
    app.Panel_5.Visible = "off";
    app.Panel_4.Visible= "off";
end
end
end

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Требования к освещению

Таблица Б.1 – Требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению рабочего места инженера-программиста

Характеристика зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд и подразряд зрительной работы	Искусственное освещение				Естественное освещение	Совмещенное освещение
			Освещенность, лк		сочетание нормируемых величин объединенного показателя дискомфорта UGR и коэффициента пульсации		KEO, %	
			при системе комбинированного освещения		при системе общего освещения		при верхнем или комбинированном освещении	при верхнем или комбинированном освещении
			Всего	В том числе от общего		UGR, не более	К <sub>п</sub> , % не более	
Высокой точности	от 0,3 до 0,5	Шв	750	200	300	25	15	3

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Электрические			
Номинальная мощность	35 Вт	Напряжение сети	230 ± 10% В
Частота питания	50 Гц	Коэффициент мощности, не менее	0,95
Класс защиты от поражения электрическим током	1		
Светотехнические			
Световой поток	3745 лм	Световая отдача светильника	107 лм/Вт
Диапазон цветовой температуры	4000 К	Цветопередача	90
Тип КСС	косинусная		
Параметры источника света			
Срок службы при температуре 25° С	100000 ч		
Эксплуатационные			
Тип источника света	СД	Количество основных источников света	1
Способ установки светильника	Встраиваемый	Климатическое исполнение	УХЛ4
Степень защиты светильника	IP20	Степень защиты электрического отсека	IP20
Степень защиты оптического отсека	IP20	Тип рассеивателя	опаловый
Масса	4,5 кг	Габариты ДхШхВ	595х595х12 мм
Срок службы светильника	12 лет	Гарантийный срок	60 мес

Рисунок В.1 – Характеристики лампы GALAD Кворум LED-35-D120-IP20-УХЛ4