

**Разработка многофункциональной наслемной системы
дополненной реальности с трехмерной прогнозной
индикацией для выполнения для задач точного управления**

АО “РСК ”МиГ”:

Терпугов А.В. – Начальник ИЦ

Ежков В.Г. – Первый заместитель начальника ИЦ

Якутин Н.Н.* – Начальник НИО-8313

Вельможин Д.В. – Начальник сектора 83132**

Волкова О.А.* – Ведущий инженер**

Хруцкий Р.А. – Инженер 1-ой категории

Жильцов А.С. – Инженер 3-й категории

e-mail:* n.yakutin@rsk-mig.ru

*e-mail**:* velmozhin.d@gmail.com

*e-mail***:* o.e.volkova@gmail.com

*Российская самолетостроительная корпорация «МиГ»,
1-й Боткинский проезд, д.7, г. Москва, 125284, Россия*

ФГБОУ “МАИ”:

Ефремов А.В. – Руководитель НИОКТР, профессор, д.т.н.

Тяглик М.С. – С.н.с., к.т.н.

*Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет) «МАИ»,*

Волоколамское шоссе, д.4, г. Москва, 125993, Россия

ООО “Квантово-оптические системы”:

Аксёнов А.И. – Генеральный директор

Смуров А.М. – Начальник отдела комплексных разработок

«Квантово-оптические системы»,

Ул. Привольная, д.65/32, пом.8, г. Москва, 109431, Россия

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МНС	4
1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	4
1.2. НАЗНАЧЕНИЕ МНС.....	4
1.3. СОСТАВ МНС	5
РАЗДЕЛ 2. СИСТЕМЫ МНС	7
2.1. АВИАЦИОННЫЙ ЗАЩИТНЫЙ ШЛЕМ С УСТАНОВЛЕННОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАШЛЕМНОЙ СИСТЕМОЙ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ	7
2.1.1. <i>Общий вид</i>	12
2.1.2. <i>Структурная схема</i>	16
2.1.3. <i>Аппаратное обеспечение МНС</i>	20
2.2. СИСТЕМА ОТСЛЕЖИВАНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЗГЛЯДА	22
2.2.1. <i>Аппаратное обеспечение</i>	22
2.2.2. <i>Программно-математическое обеспечение</i>	23
2.3. СИСТЕМА ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ГОЛОВЫ	24
2.3.1. <i>Аппаратное обеспечение</i>	24
2.3.2. <i>Программное обеспечение</i>	27
2.3.3. <i>Схема размещения</i>	28
2.4. СМЕННЫЙ БИНОКУЛЯРНЫЙ ФИЛЬТР	30
2.4.1. <i>Общий вид</i>	30
2.4.2. <i>Требования к характеристикам фильтра</i>	30
2.5. ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ.....	31
2.5.1. <i>Состав и внешний вид информации, отображаемой на индикационной системе дополненной реальности</i>	31
2.6. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС	40
2.6.1. <i>Назначение</i>	40
2.6.2. <i>Состав и схема вычислительного комплекса</i>	40
2.6.3. <i>Аппаратное обеспечение</i>	42
РАЗДЕЛ 3. СОВМЕСТИМОСТЬ МНС С ПИЛОТАЖНЫМ СТЕНДОМ СО СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ.....	43
3.1. СОВМЕСТИМОСТЬ МНС С СИСТЕМОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПИЛОТАЖНОГО СТЕНДА СО СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ.....	43
3.2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МНС И ПИЛОТАЖНОГО СТЕНДА СО СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ.....	46
РАЗДЕЛ 4. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ	51
4.1. ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНОЙ ИНДИКАЦИИ.....	51
4.2. АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА СОЗДАНИЯ И ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ.....	53
4.3. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МОНОКУЛЯРНОГО И БИНОКУЛЯРНОГО СПОСОБОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НСЦИ	55
4.4. ОЦЕНКА ЗАДАЧИ НАНЕСЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ТРЕБУЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ..	56
4.5. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ БИНОКУЛЯРНОГО ФИЛЬТРА	58
4.6. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ С МНС..	59
ВЫВОДЫ	63

Введение

В соответствии с договором между АО «РСК «МиГ» и МАИ разработана и изготовлена нашлемная система дополненной реальности, целью использования которой является повышение безопасности выполнения целевых задач пилотирования и расширение эксплуатационных возможностей авиационной техники при обеспечении наилучших пилотажных свойств. Разработанная многофункциональная нашлемная система дополненной реальности с трехмерной прогнозной индикацией для выполнения задач точного управления (МНС) базируется на оптимизированных для выполнения задач точного управления моделях; включает в себя разработанные схемы, методики и алгоритмы функционирования системы отображения информации; обеспечивает интеграцию с современными и перспективными авиационными исследовательскими стендами и тренажерами.

Индикаторы на лобовом стекле (ИЛС), которыми оборудовано большинство современных самолетов, предоставляют летчику широкие возможности по осуществлению контроля полета и прицеливанию, но при этом не лишены своих недостатков:

- фиксированное положение, что заставляет летчика чаще смотреть вперед;
- малый угол обзора (около 25 градусов); чтобы поместить объект в поле зрения ИЛС, требуется маневр самолета;
- занимают место на приборной доске.

Нашлемные системы целеуказания и индикации (НСЦИ) отображают данные прямо поверх закабинного пространства и позволяют смотреть в сторону с сохранением информации в поле зрения, что повышает качество работы летчика и безопасность полета. Это необходимо в условиях боевых действий и на напряженных фазах полета, но, в отличие от ИЛС, при помощи НСЦИ появляется возможность брать на прицел цели, находящиеся в стороне от строительной оси самолета. Будучи скомбинированными с ИЛС, они значительно повышают возможности летчика в бою.

Раздел 1. Основные сведения о МНС

1.1. Общие сведения

В соответствии с договором от «21» января 2016 г. № 700020155 между АО «РСК «МиГ» и МАИ на выполнение научно-исследовательской, опытно-конструкторской и технологической работы «Разработка многофункциональной нашлемной системы дополненной реальности с трехмерной прогнозной индикацией для выполнения задач точного управления» (далее МНС) разработана и изготовлена нашлемная система дополненной реальности целью использования которой является повышение безопасности выполнения целевых задач пилотирования и расширение эксплуатационных возможностей авиационной техники при обеспечении наилучших пилотажных свойств. Нашлемная система базируется на оптимизированных для выполнения задач точного управления моделях; разработаны схемы, методики и алгоритмы функционирования системы отображения информации. Обеспечена интеграция нашлемной системы с моделирующим комплексом, снабженным стереоскопической системой визуализации (Комплексом РВ).

Нашлемная система дополненной реальности обеспечивает возможность целевого применения в центрах обучения - для профессиональной подготовки летного состава, в научно-исследовательских центрах и на предприятиях-разработчиках сложных технических систем - для проведения исследований.

1.2. Назначение МНС

Разработанная нашлемная система дополненной реальности предназначена для повышения точности выполнения лётным составом на моделирующем комплексе со стереоскопической системой визуализации широкого круга целевых задач траекторного управления, таких как:

- дозаправка топливом в полете;
- маловысотный полет в режиме огибания рельефа местности;
- посадка, включая посадку на авианосец и сверхкороткую полосу;
- руление по ВПП и палубе ТАКР;

- выполнение всех видов допустимых маневров пилотируемым/беспилотным ЛА.

Изделие позволяет проводить обучение и подготовку летного состава на пилотажном стенде к выполнению задач точного управления. Использование Изделия повысит безопасность выполнения в условиях реального пилотирования перечисленных выше целевых задач, а также расширит эксплуатационные возможности при управлении сложными техническими объектами (авиационная техника, космические ЛА, беспилотные ЛА, роверы и др.).

1.3. Состав МНС

В состав разрабатываемой многофункциональной наплечной системы входят:

1. Наплечное визирное устройство в составе:
 - монокулярный полупрозрачный дисплей;
 - проекционное устройство;
 - система отслеживания направления взгляда летчика;
2. Блок обработки информации (БОИ);
3. Комплект соединительных кабелей;
4. Программно-математическое обеспечение, включающее математические модели, алгоритмы и программы;
5. Комплект эксплуатационной документации;
6. Упаковка.

Состав конфигурации для совместной работы опытного образца МНС и Комплекса РВ:

1. Авиационный защитный шлем (ЗШ);
2. НВУ, устанавливаемое на ЗШ;
3. БОИ, устанавливаемый в кабине Комплекса РВ и обеспечивающий сопряжение НВУ с Комплексом РВ;
4. Система отслеживания положения головы оператора;
5. Бинокулярный фильтр (БФ);

6. Вычислитель дополненной реальности (ВДР), обеспечивающий генерацию трехмерной прогнозной индикации на оборудовании Комплекса РВ.

Раздел 2. Системы МНС

2.1. Авиационный защитный шлем с установленной многофункциональной нашлемной системой дополненной реальности

Защитный шлем является составной частью высотного снаряжения лётчика. Шлем защищает голову от возможных ударов в кабине самолета во время полета и от аэродинамических и ударных нагрузок при аварийном покидании самолета во всем диапазоне высот и скоростей.

Максимальная высота применения шлема с использованием высотного костюма до 20000 метров.

Шлем защищает летчика от шума, ослепления солнечными и прожекторными лучами. Обеспечивает двустороннюю радиосвязь. В современные шлемы встраиваются различные навигационные приборы, датчики и экраны для вывода данных.

Основной тип, применяемый в ВВС РФ — авиационный шлем серии ЗШ-3, ЗШ-5, ЗШ-7 и ЗШ-10.

Выбор в пользу ЗШ-7 был сделан по результатам анализа мнений летчиков АО «РСК «МиГ». Данная модель защитного шлема в течение продолжительного времени успешно применялась летным составом на самолетах марки «МиГ», привычна и комфортна для летчиков. Ещё одним аргументом в пользу выбора данной модели шлема послужил тот фактор, что она имеет более компактные размеры по сравнению с новым ЗШ-10.

Расшифровка модификаций ЗШ-7

- ЗШ-7 базовая (опытная) модель. Без пяти отверстий и без пиропатронов закрывания светофильтра;
- ЗШ-7А - основной тип. Появились пять отличительных отверстий, окантованных металлическими шайбами, уменьшающих действие аэродинамических сил при катапультировании и автоматический пиромеханизм опускания светофильтра;
- ЗШ-7АП - возможность монтирования НВУ-7;

- ЗШ-7АПН - отличается от “АП” низкоомными телефонами (в “А” и “АП” - высокоомные);
- ЗШ-7АС - встроенная гарнитура спец.связи;
- ЗШ-7АПС - отличается от “АС” возможностью монтирования НВУ-7;
- ЗШ-7АБ - отличается от “АС” противоосколочной защитой каски и светофильтра. В конструкции кроме стеклопластика применен кевлар;
- ЗШ-7В - вертолетный. В основе ЗШ-7АБ, но с НВУ и без аэродинамических отверстий. Отличается также защитным (зеленым) цветом.

Расшифровка буквенных обозначений (литер), применяемых в маркировке ЗШ

- А - Автоматический (пиромеханизм);
- П - Прицел (кронштейн НВУ);
- Н - Низкоомный (низкоомная гарнитура);
- С - Связной (спец.связь);
- Б – Бронированный;
- В – Вертолетный;
- И - Испытательный.

Материал, из которого изготовлены все модификации ЗШ-7 за исключением модификаций с литерой "Б" и "В" - стеклопластик. Не горюч и очень прочен к нагрузкам на разрыв и на сдавливание.

На следующих рисунках приведены фотографии ЗШ-7АП в различных ракурсах, а так же комплекта ЗИП и тары.



Рис. 2.1.1. ЗШ-7АП (вид сверху).



Рис. 2.1.2. ЗШ-7АП (вид сбоку).



Рис. 2.1.3. ЗШ-7АП (вид снизу).



Рис. 2.1.4. ЗШ-7АП (вид спереди с убранным светофильтром).



Рис. 2.1.5. ЗШ-7АП (вид спереди с опущенным светофильтром).



Рис. 2.1.6. ЗШ-7АП (комплект ЗИП).



Рис. 2.1.7. ЗШ-7АП (тара).

Комплектность шлема ЗШ-7А

- Защитный шлем;
- Ларингофон;
- Подшлемник шерстяной;
- Подшлемник х/б;
- Чехол шлема;
- Коробка шлема;
- Паспорт;
- Комплект ЗИП:
 - Амортизатор;
 - Валик наушника;
 - Подушка подбородочная;
 - Подушка теменная;
 - Ларингофон;
 - Подшлемник х/б;
 - Групповой комплект запасных частей.

2.1.1. Общий вид

Аппаратная часть МНС состоит из следующих блоков:

- нашлемного визирного устройства (НВУ);
- систем отслеживания направления взгляда и положения головы;
- блока обработки информации (БОИ);
- вычислителя дополненной реальности МНС (ВДР).

На рисунке 2.1.1.1. представлена 3D-модель общего вида авиационного защитного шлема с установленной МНС.

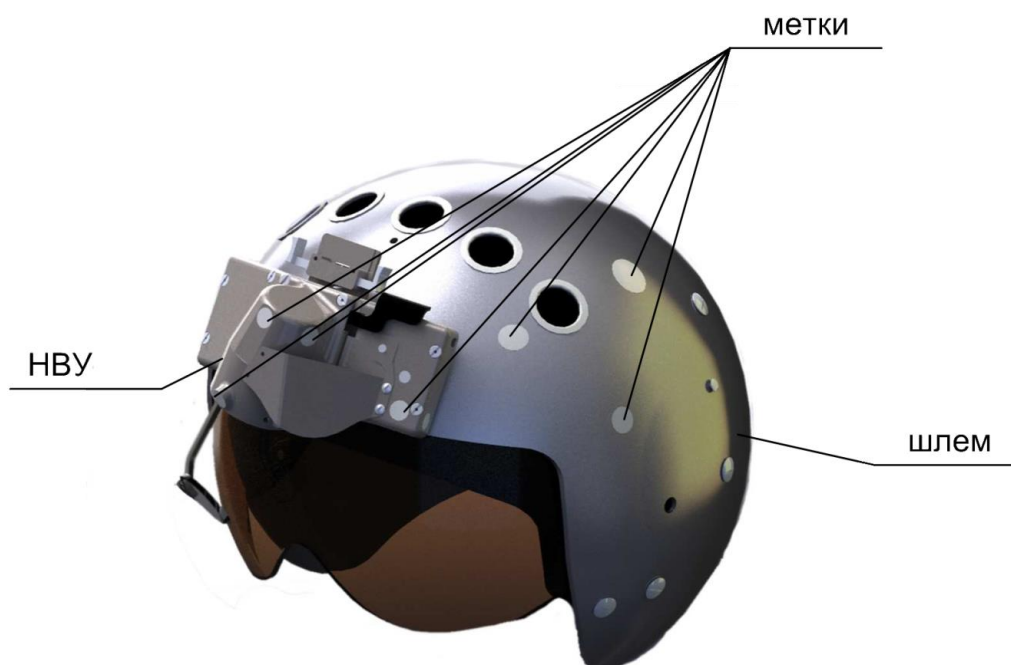


Рис. 2.1.1.1. Общий вид авиационного защитного шлема с установленной МНС.

На защитный шлем летчика устанавливается нашлемное визирное устройство с системой отслеживания направления взгляда. НВУ, в свою очередь, подключается к блоку обработки информации. Вычислитель дополненной реальности формирует видеосигнал, который должен быть сконвертирован БОИ и передан на НВУ.

Далее подробнее представлен общий вид двух основных блоков МНС, нашлемного визирного устройства и блока обработки информации.

2.1.1.1. Нашлемное визирное устройство

На рисунке 2.1.1.1.1 представлен общий вид НВУ с габаритными размерами.

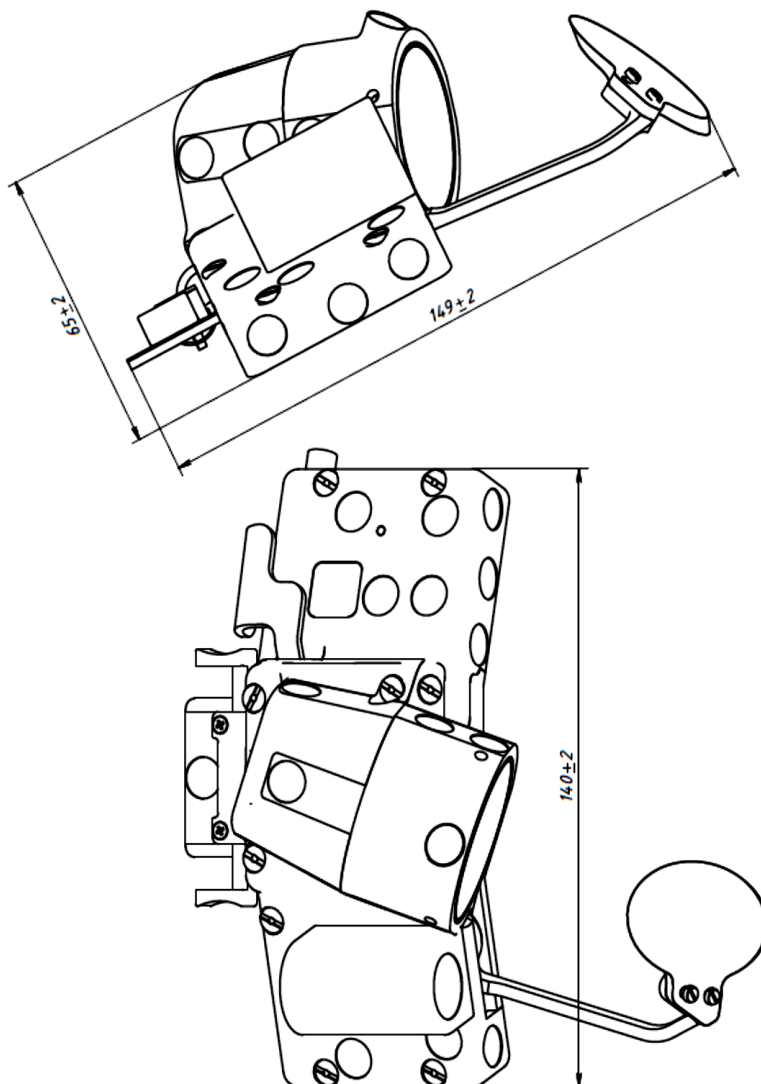


Рис. 2.1.1.1.1. Общий вид нашлемного визирного устройства.

2.1.1.2. Блок обработки информации

На рисунке 2.1.1.2.1. приведён внешний вид БОИ.

На рисунке 2.1.1.2.2. приведены габаритные размеры БОИ.

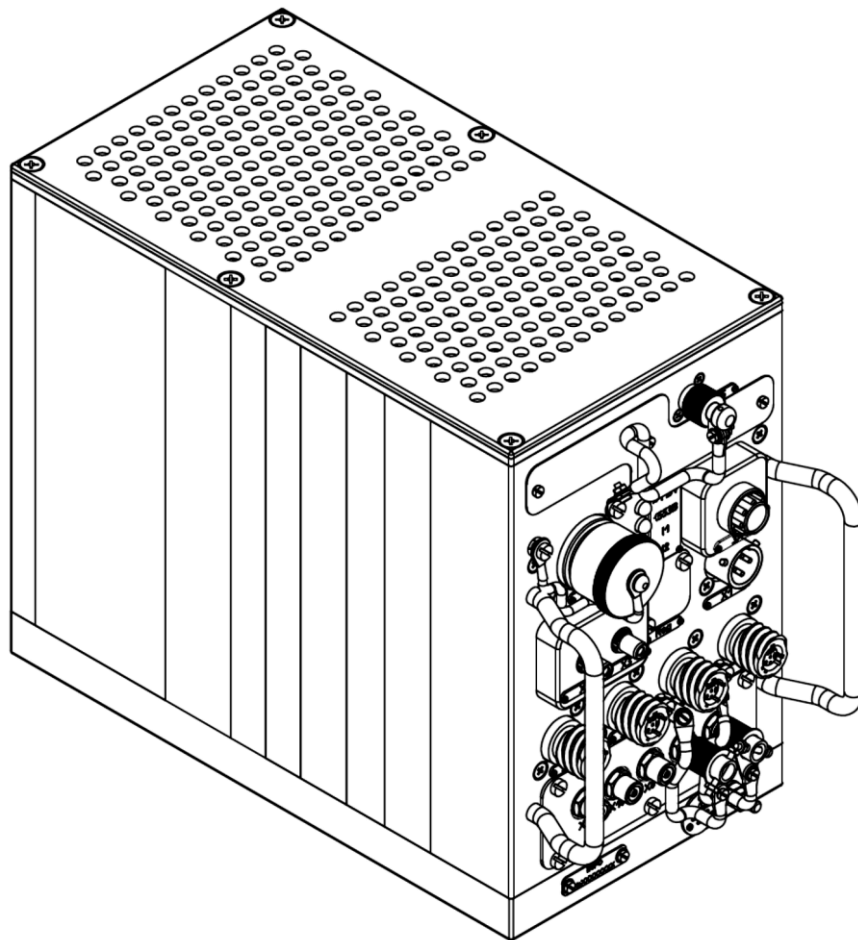


Рис. 2.1.1.2.1. Внешний вид БОИ.

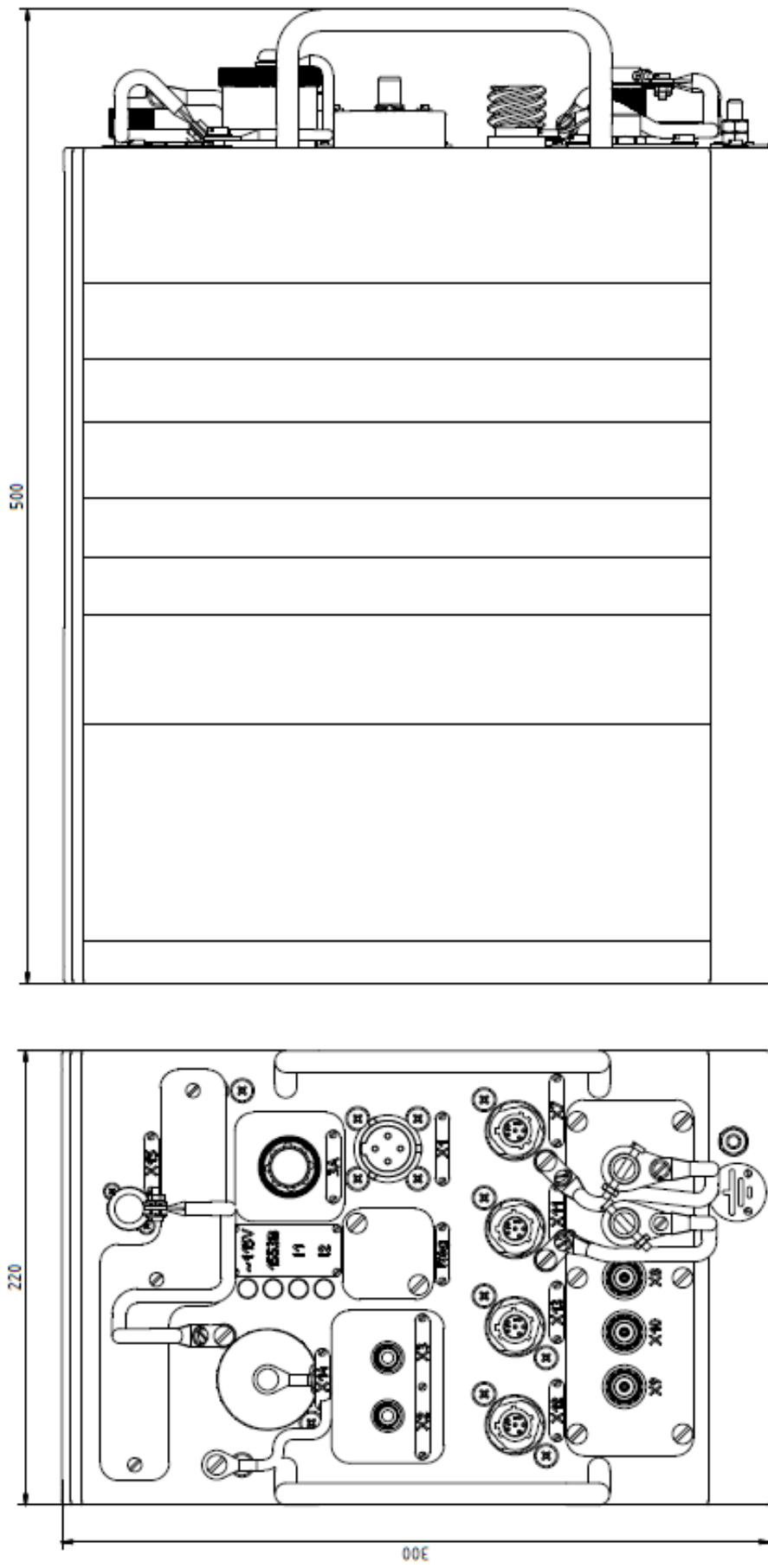


Рис. 2.1.1.2.1. Габаритные размеры БОИ.

2.1.2. Структурная схема

На рисунках 2.1.2.1...2.1.2.3 представлены структурные схемы МЧС и основных её компонентов, БОИ и НВУ.

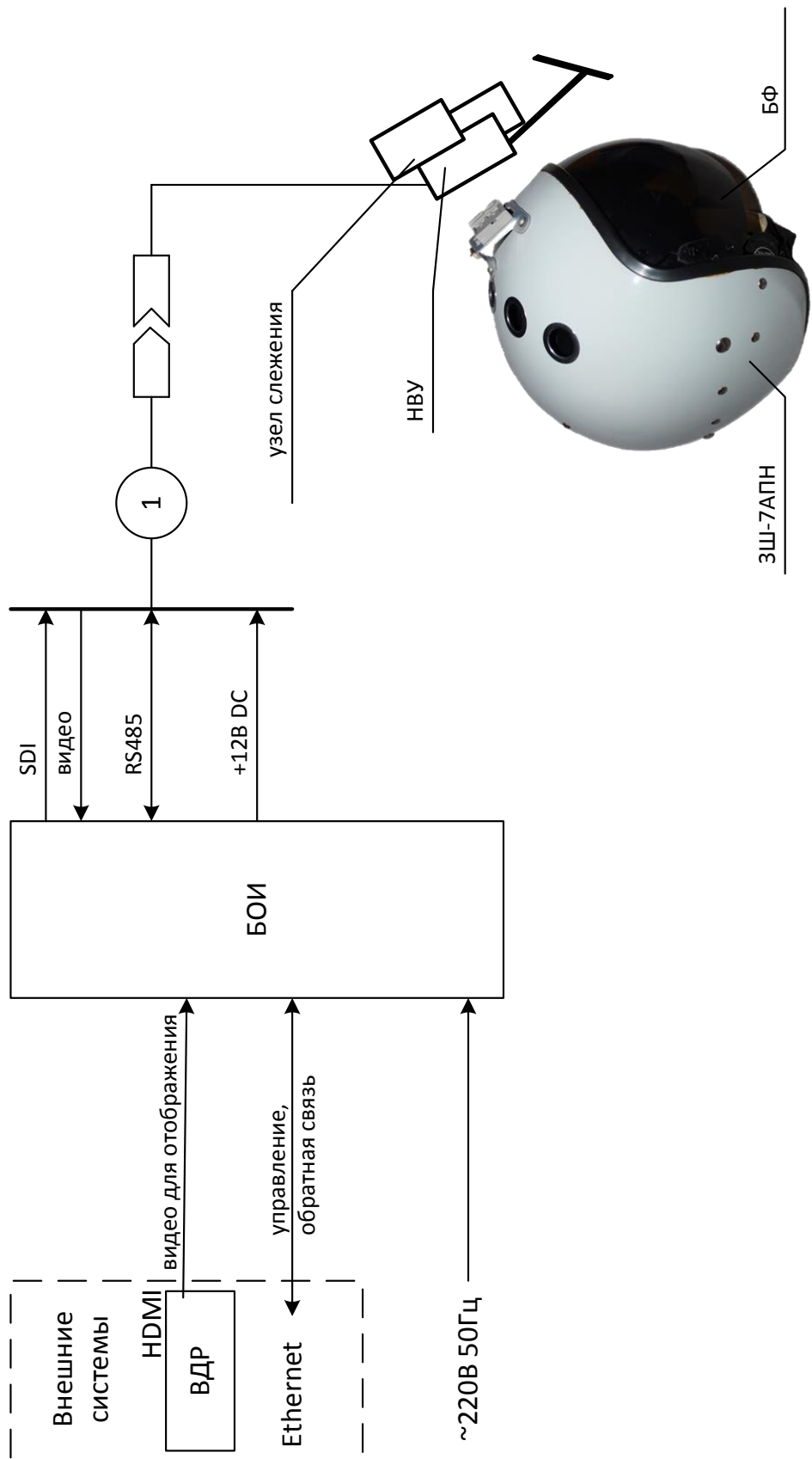


Рис. 2.1.2.1. Структурная схема МНС.

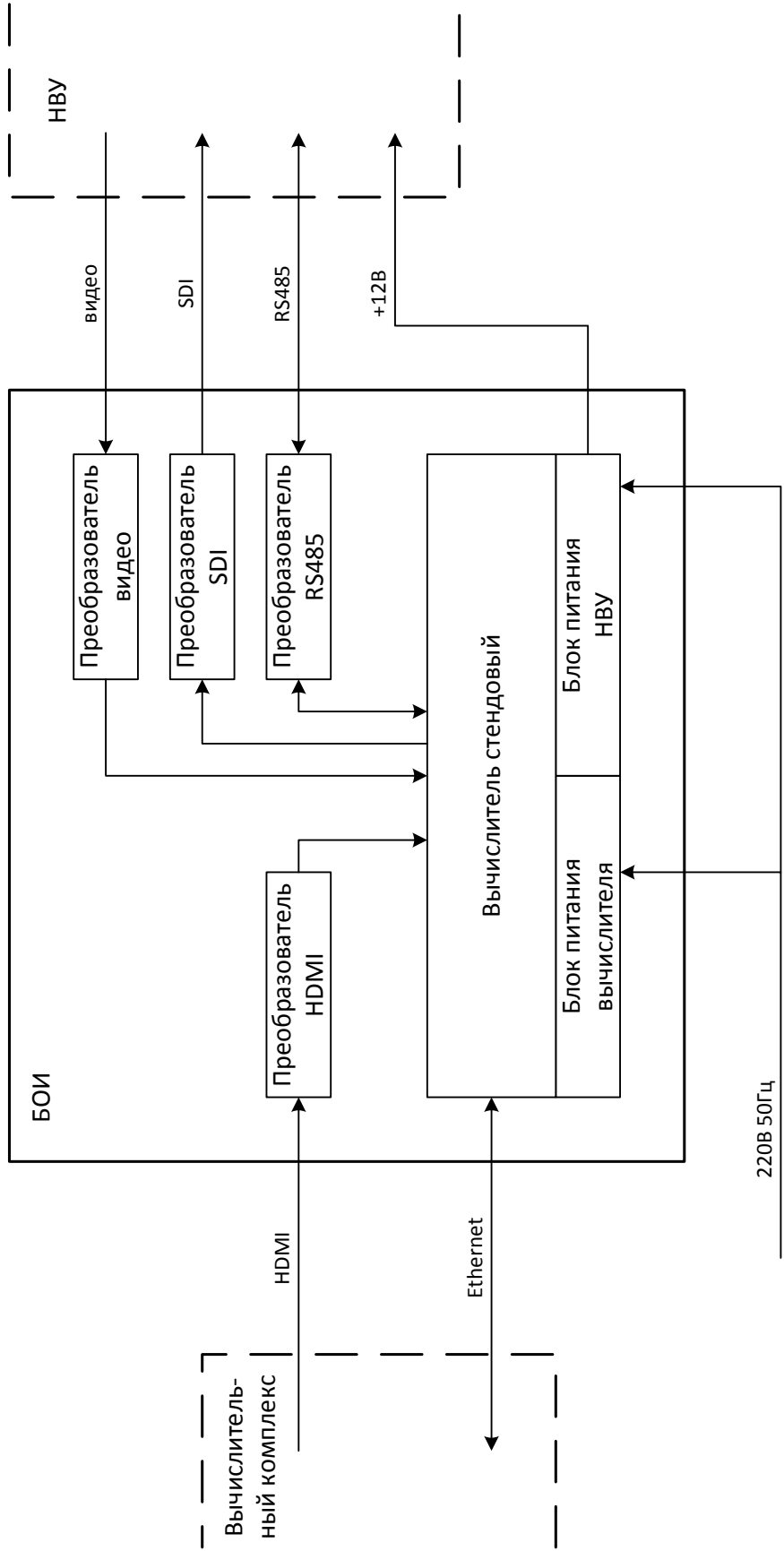


Рис. 2.1.1.2.2. Структурная схема БОИ.

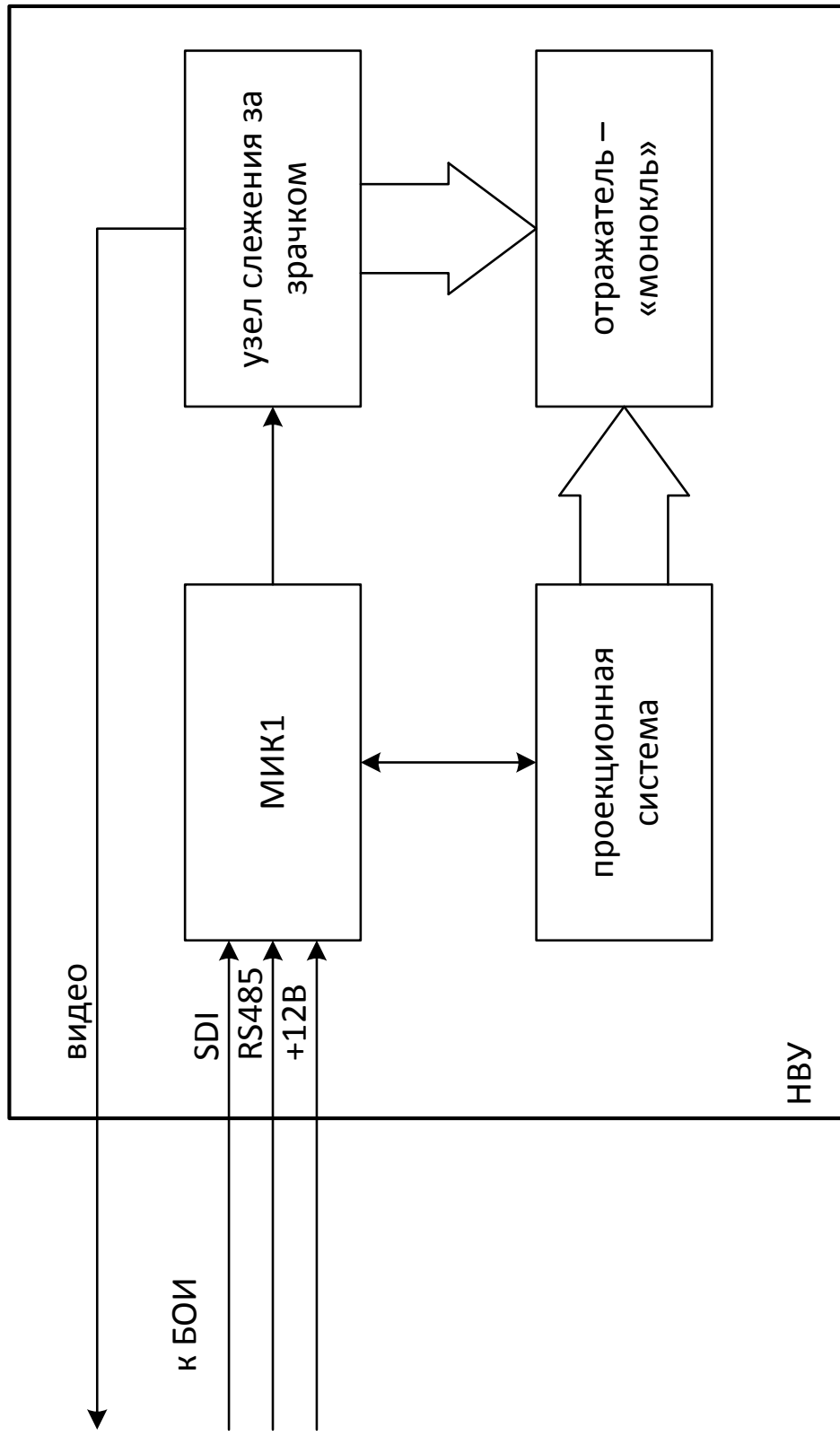


Рис. 2.1.1.2.3. Структурная схема НВУ.

2.1.3. Аппаратное обеспечение МНС

Далее подробнее рассмотрим назначение некоторых блоков МНС.

2.1.3.1. Нашлемное визирное устройство

НВУ предназначено для:

- формирования коллимированного изображения символьной информации в поле зрения правого глаза оператора стенда;
- приёма информационного кадра с символикой на визуализацию от БОИ;
- передачи потока видеоинформации от узла слежения в БОИ.
- слежения за положением направления взгляда оператора пилотажного стенда

НВУ включает в себя следующие основные функциональные узлы:

- модуль индикации (МИК1);
- проекционную систему;
- отражатель – «монокль»;
- узел слежения за зрачком.

2.1.3.2. Блок обработки информации

БОИ предназначен для:

- приёма информационного кадра от вычислителя дополненной реальности по каналу HDMI и выдачу его без модификаций на визуализацию НВУ;
- стыковки и обмена информацией с вычислителями стенда по каналу Ethernet;
- формирования напряжения питания для НВУ;
- стыковки и обмена информацией с НВУ по каналам SDI и RS485;
- приёма и обработки видеоизображений от узла слежения за зрачком, входящего в состав НВУ.

БОИ включает в себя следующие основные функциональные узлы:

- а) вычислитель стендовый;
- б) преобразователь HDMI;
- в) преобразователь RS485;
- г) преобразователь SDI;
- д) преобразователь видео;
- е) блок питания вычислителя;
- ж) блок питания НВУ.

Вычислитель БОИ обеспечивает:

- обмен данными с вычислителями стенда;
- приём изображения на визуализацию от вычислителей стенда;
- выдачу изображения на визуализацию НВУ;
- управление НВУ;
- приём и обработку информации от узла слежения за глазом.

Преобразователи HDMI, RS485, SDI и видео, входящие в состав БОИ, обеспечивают преобразование данных для приёма вычислителем по стандартным интерфейсам.

Блоки питания в составе БОИ обеспечивают питание вычислителя и формируют питающее напряжение для НВУ.

2.1.3.3. Вычислитель дополненной реальности

ВДР предназначен для:

- генерации и передачи информационного кадра в БОИ по каналу HDMI;
- обмена информацией с вычислителями стенда по каналу Ethernet.

ВДР располагается в одной стойке с вычислительным комплексом Комплекса РВ. В качестве вычислителя дополненной реальности может быть использован как компьютер из состава вычислительного комплекса пилотажного стенда, так и отдельный дополнительный компьютер,

2.2. Система отслеживания направления взгляда

В состав НВУ входит система отслеживания направления взгляда, обеспечивающая слежение за положением зрачка оператора пилотажного стенда.

Конструктивно система отслеживания направления взгляда представляет собой узел, состоящий из матричного фотоприёмника и ИК-подсветки, управляемых от БОИ. Данный узел устанавливается относительно моногля таким образом, чтобы в фокальной плоскости фотоприёмника обеспечивалось формирование изображения глаза оператора стенда.

2.2.1. Аппаратное обеспечение

Рабочий спектральный диапазон работы фотоприёмника и подсветки выбран исходя из двух факторов:

1. максимально резкое и контрастное изображение зрачка на фоне;
2. безопасность падающего излучения для глаз оператора.

Рабочий спектральный диапазон составляет 0,8 – 0,9 мкм и задаётся спектральным фильтром, расположенным перед фотоприёмником. Подсветка обеспечивается отдельными светодиодами, работающими в диапазоне 0,8 - 0,9 мкм. Безопасность излучения по нормам ГОСТ Р МЭК 62471-2013 подтверждается расчётом, проведённым в рамках ОКР по созданию НСЦИ-КОС. Данный подход практически реализован в системе позиционирования из состава НСЦИ-КОС и показал положительные результаты, как в части распознавания объектов, так и в части безопасности для глаз.

Фотоприёмник базируется на CMOS-матрице Artina AR0134, сопряжённой с узкопольным объективом. Объектив обеспечивает формирование в фокальной плоскости матрицы изображения глаза оператора стенда.

Внешний вид (без оптики и корпуса) представлен на рисунке 2.2.1.1.



Рис. 2.2.1.1. Внешний вид фотоприёмника узла слежения за глазом

В качестве источника подсветки служат 3 светодиода SFH 4547

Светодиоды работают в импульсном режиме:

- свечение 200 мкс;
- период 10 000 мкс.

Количество светодиодов подсветки, их ориентация и параметры управления напрямую зависят от условий работы.

Для комфортного ношения шлема с установленным оборудованием НВУ и кронштейн с метками системы отслеживания положения головы уравнивают друг друга. Во время настройки на стенде выполняется балансировка шлема.

2.2.2. Программно-математическое обеспечение

ПМО для системы отслеживания направления взгляда оператора соответствует перечисленным ниже требованиям:

Таблица 2.2.2.

№№ п/п	Наименование	Описание
1	Язык программирования	C++
2	Операционная система	Совместимая с ОС семейства Microsoft

		Windows (XP/7/8/8.1 x64)
3	Среда разработки	Совместимая с Microsoft Visual Studio 2010/2013
4	Входные параметры	Параметры, задающие смещение центра системы координат для отслеживания направления взгляда оператора
5	Выходные параметры	Передаются по сетевому протоколу (параметры, определяющие направление взгляда оператора (летчика), измеряемые датчиками нашлемной системы дополненной реальности, в системе координат, связанной с нашлемной системой)

2.3. Система отслеживания положения головы

Система отслеживания положения головы контролирует положение шлема и угловое направление прицельной метки при повороте головы пилота в следующем диапазоне углов, обеспечивая указанную точность измерения:

- по азимуту $\varphi_y = \pm 120^\circ$, при этом:
 - основной диапазон: $\varphi_y = \pm 15^\circ$;
 - расширенный диапазон: $\varphi_y = -75^\circ \dots -15^\circ$ и $+15^\circ \dots +75^\circ$;
 - предельный диапазон: $\varphi_y = -120^\circ \dots -75^\circ$ и $+75^\circ \dots +120^\circ$;
- по углу места $\varphi_z = -30^\circ \dots +60^\circ$, при этом:
 - основной диапазон: $\varphi_z = \pm 15^\circ$;
 - расширенный диапазон: $\varphi_z = -30^\circ \dots -15^\circ$ и $+15^\circ \dots +60^\circ$;
- по углу крена головы летчика места $\varphi_x = \pm 30^\circ$.

2.3.1. Аппаратное обеспечение

В работе используется система отслеживания положения головы производства фирмы OptiTrack. Данная система входит в состав Комплекса РВ.

Система отслеживания положения головы состоит из следующих элементов:

1. Инфракрасных камер (рис. 2.3.1.1), которые можно закрепить с помощью кронштейнов, например, на верхней кромке экрана (рис. 2.3.1.2).



Рис. 2.3.1.1. Инфракрасная камера.

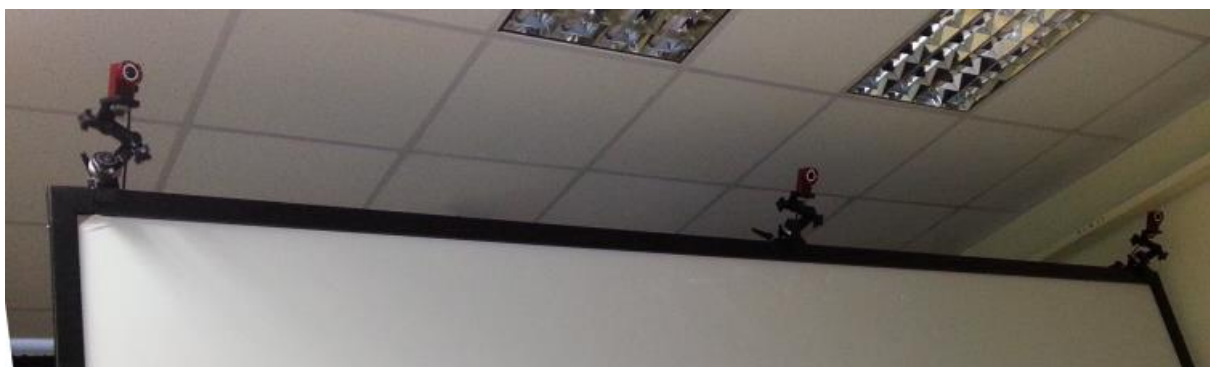


Рис. 2.3.1.2. Расположение камер на каркасе экрана.

2. Концентратора OptiHub (рис. 2.3.1.3), к которому подключаются камеры;



Рис. 2.3.1.3. Концентратор ОптіНуб для подключения камер.

3. Инструмента для калибровки системы координат (рис. 2.3.1.4);

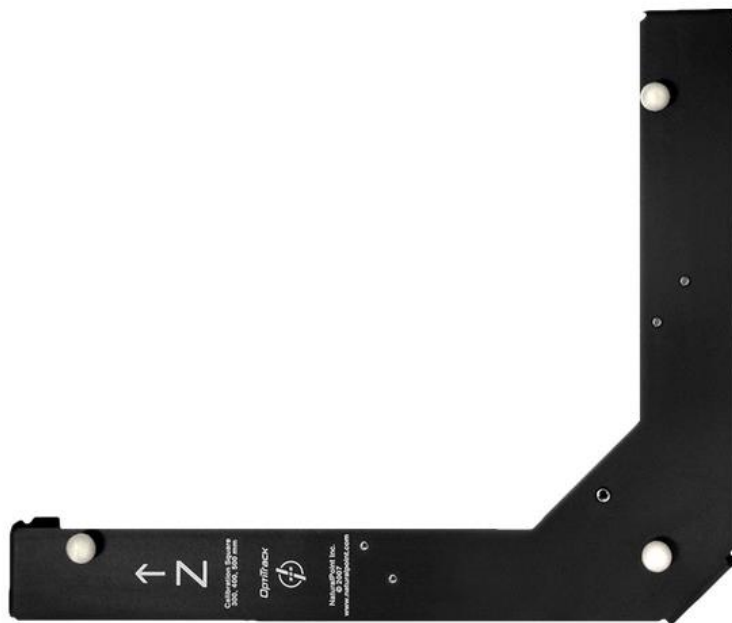


Рис. 2.3.1.4. Инструмент для привязки системы координат.

4. Инструмента Optiwand Kit (рис. 2.3.1.5), предназначенного для калибровки камер.



Рис. 2.3.1.5. Инструмент Optiwand.

5. Маркеров, закрепляемых на отслеживаемом объекте, например, на ЗШ.
6. Вычислительного комплекса, выделенного для обработки сигналов от инфракрасных камер, подключенных через концентратор OptiHub;
7. ПМО OptiTrack Motive с аппаратным ключом, установленного на данный вычислительный комплекс.

Для интеграции системы отслеживания положения головы Комплекса РВ и МНС разработано соответствующее программное обеспечение.

2.3.2. Программное обеспечение

Разработанное ПМО для системы отслеживания положения головы оператора соответствует перечисленным ниже требованиям:

Таблица 2.3.2.

№№ п/п	Наименование	Описание
1	Язык программирования	C++
2	Операционная система	Совместимая с ОС семейства Microsoft Windows (XP/7/8/8.1 x64)
3	Среда разработки	Совместимая с Microsoft Visual Studio 2010/2013
4	Входные параметры	Настраиваемый конфигурационный файл, в котором задается смещение

		системы координат для отслеживания положения головы оператора
5	Выходные параметры	Координаты и углы поворота головы оператора (летчика), вычисляемые по данным с инфракрасных камер системы отслеживания положения головы, передаются по протоколу UDP

2.3.3. Схема размещения

На следующем рисунке представлена схема размещения камер системы слежения за положением головы.

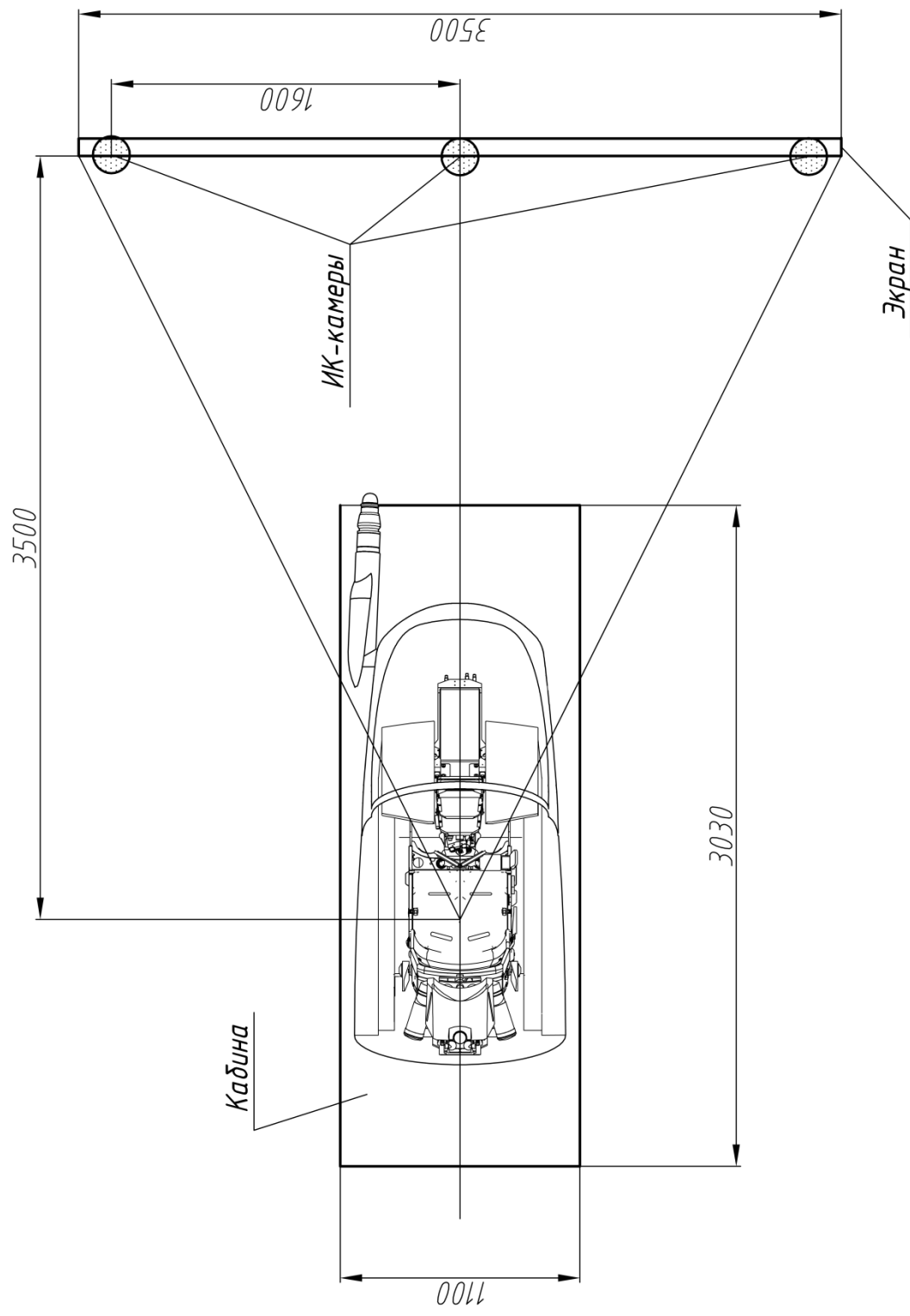


Рис. 2.3.3.1. Схема размещения камер системы слежения за положением головы.

2.4. Сменный бинокулярный фильтр

Входящий в состав МНС бинокулярный фильтр (БФ) предназначен для воспроизведения стереоскопического эффекта оператору МНС.

Основное преимущество БФ перед стереочками состоит в том, что БФ, имитируя стандартный светофильтр, входящий в комплект защитного шлема, позволяет оператору (летчику) выполнять тренировочные полеты на пилотажном стенде без каких-либо дополнительных вспомогательных устройств, способствуя соответствию внешнего окружения летчика ощущениям в реальном полете.

2.4.1. Общий вид

На рисунке представлена 3D-модель (рис. 2.4.1.1) бинокулярного фильтра .

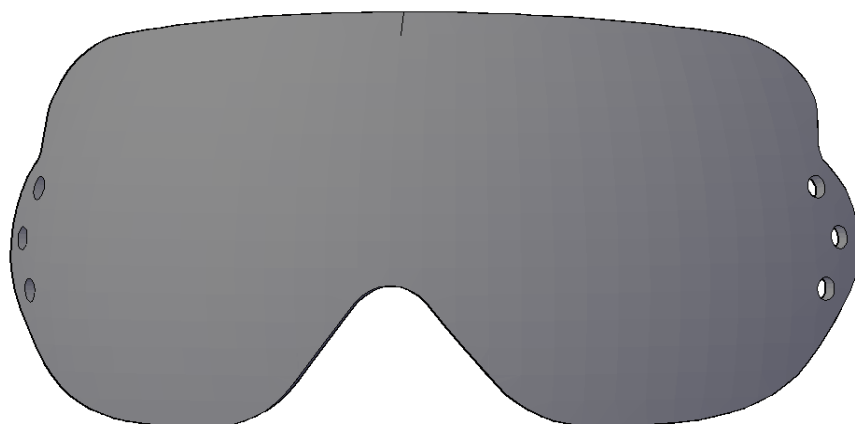


Рис. 2.4.1.1. 3D-модель БФ.

2.4.2. Требования к характеристикам фильтра

Бинокулярный фильтр для защитного шлема соответствует перечисленным ниже требованиям:

Таблица 2.4.2.1.

№№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Материал	Оргстекло
2	Коэффициент светопропускания не менее	75%
3	Стереофильтр	Разделение стереоизображений для левого и правого глаза
4	Стереотехнология	Круговая поляризация
5	Масса, не более	600г

2.5. Программно-математическое обеспечение

Индикация положения самолета на дисплее нашьемной системы дополненной реальности реализована в двух вариантах с возможностью переключения между ними: обратная индикация (вид «с земли на самолет») и прямая индикация (вид «с самолета на землю»). Параметры отображаются в метрической системе измерения.

При недостоверности или при отсутствии обновления параметра в течение десяти циклов обмена, связанные с ним символы (шкала, индекс, цифровой индикатор, текстовый транспарант) снимаются с индикации.

2.5.1. Состав и внешний вид информации, отображаемой на индикационной системе дополненной реальности

Определение ориентации линии визирования МНС и генерация символики для индикации на моногле МНС осуществляется ПМО МНС.

Система координат

Используемая система координат МНС показана на рисунке 2.5.2.1.

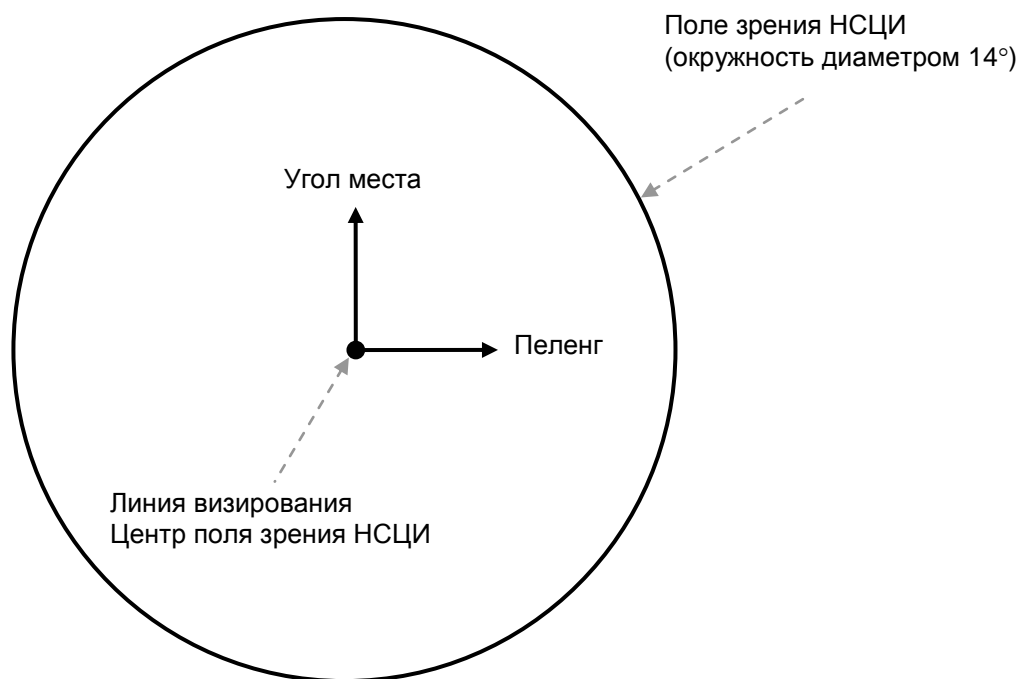


Рис. 2.5.2.1.

Перевод из СК ЛГЛ в СК МНС осуществляется стандартным преобразованием Эйлера.

Используемые шрифты

Предопределены два шрифта: большой и малый. Каждая литера занимает прямоугольник с разделительным пробелом. При задании стартовой точки литеры указываются координаты левого нижнего угла прямоугольника.

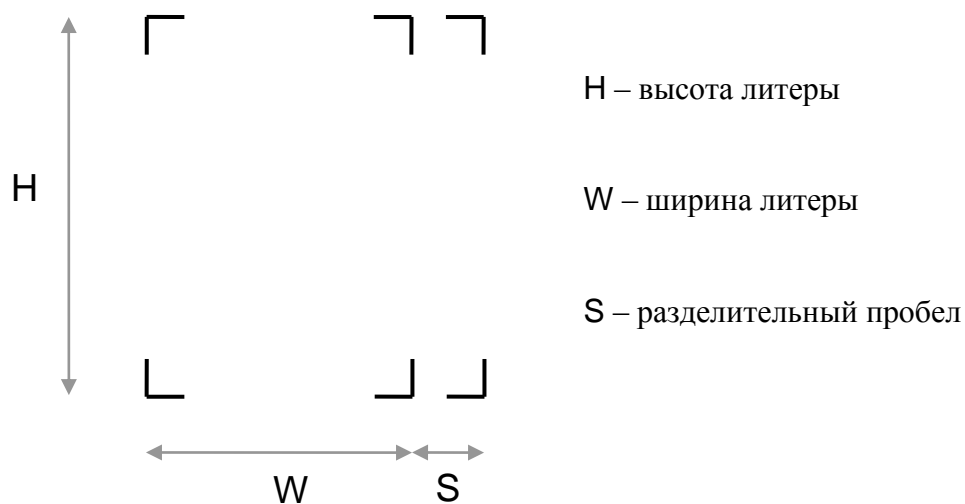


Рис. 2.5.2.2. Геометрические размеры литер

Ниже приведены размеры литер в градусах.

Таблица 2.5.2.1. Размеры литер в градусах.

Размер шрифта	H	W	S
Малый	~ 0.50°	~ 0.35°	~ 0.08°
Большой	~ 0.63°	~ 0.40°	~ 0.16°

2.5.1.1. Базовая символика индикации нашлемной системы дополненной реальности

На рисунке 2.5.2.1.1. представлена базовая символика для отображения на дисплее нашлемной системы дополненной реальности.

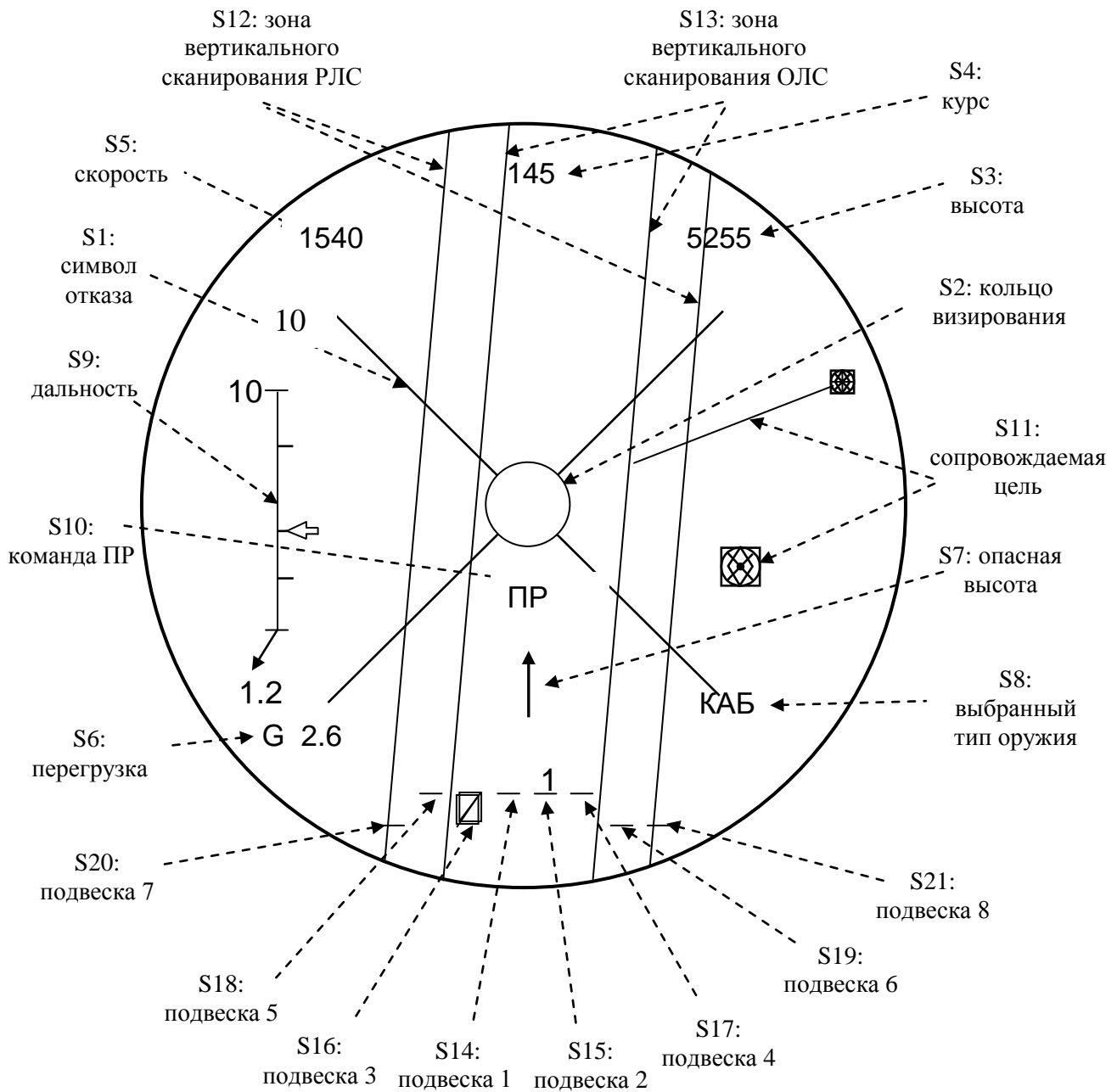


Рис. 2.5.2.1.1. Базовый набор символов системы индикации.

1. Рисунок является интегральным: не все символы могут одновременно присутствовать на изображении;
2. Символ S11 (сопровождаемая цель) показан в двух вариантах рисования: цель, находящаяся вне поля зрения МНС (вверху) и в пределах поля зрения МНС (внизу);
3. Символы S14 – S21 (подвески 1 – 8) идентичны; для каждого номера подвески показаны различные варианты рисования.

2.5.1.2. Внешний вид прогнозной индикации

К особенностям пилотирования самолета при выполнении задач траекторного управления можно отнести повышенный порядок астатизма объекта управления в продольном канале (2-ой порядок) и в боковом канале (3-й порядок), неустойчивость самолета по скорости (при посадке на ограниченную площадку), а также повышенные требования к точности. Управление таким объектом требует чрезмерной загрузки, введения опережающих действий и образования летчиком дополнительных контуров и каналов. Такой характер действий летчика, хотя и позволяет осуществлять устойчивый процесс пилотирования, но требует одновременного контроля сразу нескольких параметров полета и постоянного распределения внимания между ними, что в итоге снижает точность выполнения задачи.

Для устранения этих недостатков необходимо создание таких средств автоматизации, при использовании которых пилотирование самолета будет осуществляться:

- в одноконтурной системе самолет-летчик, что практически исключит необходимость функционирования летчика в нескольких контурах и каналах управления;
- с динамикой самолета в данной одноконтурной системе, которая обеспечит наилучшее качество выполнения целевой задачи (такой динамике соответствует объект управления, имеющий наклон амплитудно-частотной характеристики -20 ДБ/дек в широком диапазоне частот).

Для реализации этих двух целей в настоящей работе используется система отображения информации (СОИ), содержащая прогнозную индикацию, которая позволила перейти от 2-х контурной к одноконтурной системе.

В качестве прогнозной информации на экране дисплея формируют прогнозный угол наклона траектории $\theta_{iv}(t)$ и проецируют его на плоскость, расположенную на расстоянии $L_{пр}$ и скользящую перед самолетом со скоростью, равной его скорости (см. Рис. 2.5.2.3.1).

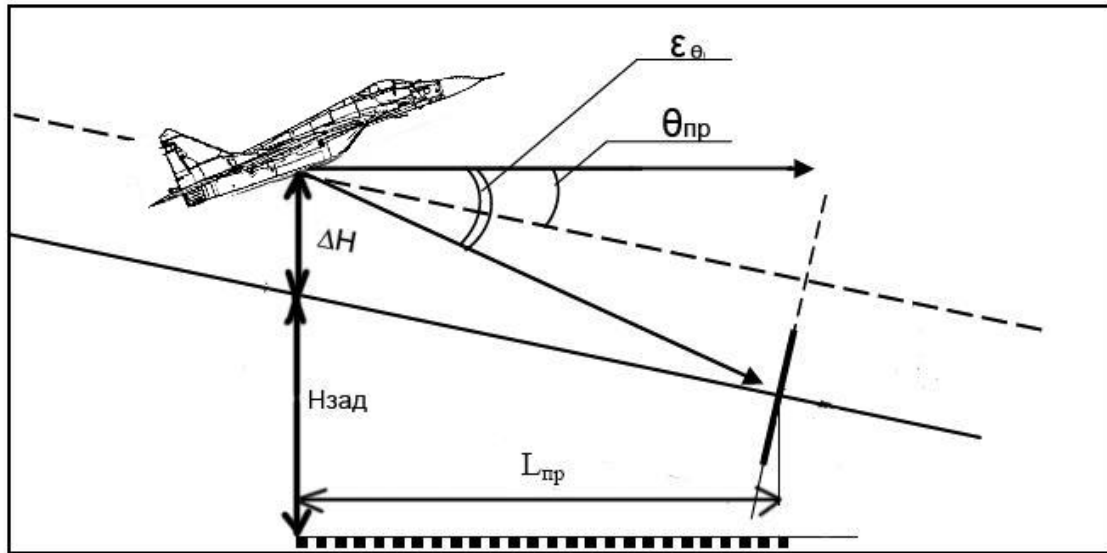


Рис 2.5.2.3.1. Принцип формирования прогнозной информации для задач траекторного управления.

Найдем передаточную функцию объекта управления для предложенного варианта. Для этого, прежде всего, необходимо получить выражение для прогнозного угла наклона траектории $\theta_{пр}$ через время $T_{пр}$. ($T_{пр}=L_{пр}/V$).

На Рис. 2.5.2.3.2 изображено движение самолета по криволинейной траектории с радиусом кривизны R . Прогнозировать такую траекторию по условиям задачи необходимо на расстояние $L_{пр}$ (в точку "А"). Здесь θ_T - величина, показывающая, на сколько изменится угол наклона траектории через время T . Рассмотрим равнобедренный треугольник ABC. В этом треугольнике угол "С" можно вычислить как $90 - \frac{\theta T}{2}$. С учетом того, что движение происходит по дуге окружности и заданный вектор скорости является касательным к ней, то есть он перпендикулярен радиусу R (грань "BC"). Отсюда несложно получить, что

$$\theta_{пр} = \theta + \frac{\theta T_{пр}}{2}, \text{ где } T_{пр} = \frac{L_{пр}}{V}.$$

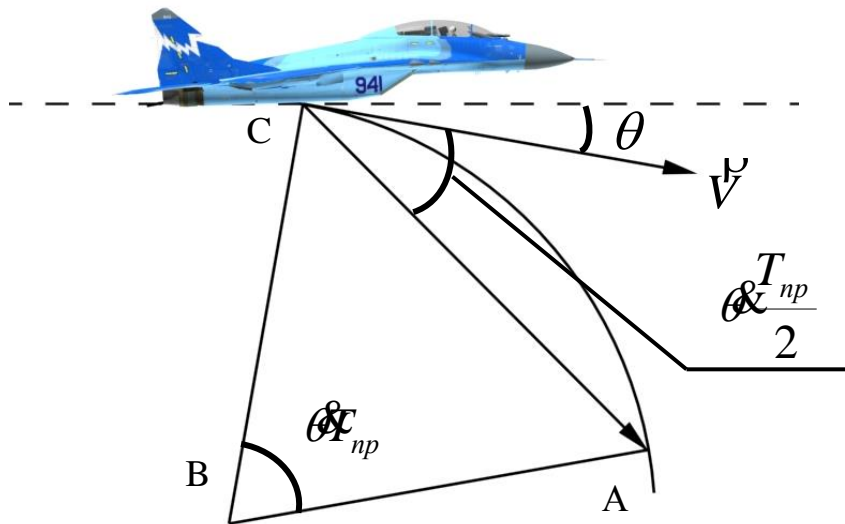


Рис 2.5.2.3.2. Прогнозирование движения по криволинейной траектории (для задачи огибания рельефа местности).

На положение проекции прогнозируемого вектора $\theta_{пр}$ на окно, находящееся на расстоянии L , влияет также и изменение положения самолета по высоте (см. Рис. 2.5.2.3.1).

Здесь $\Delta H = H - H_{зад}$

Таким образом, проекция прогнозного вектора на плоскость, находящуюся на расстоянии $L_{пр}$ определяется углом визирования $\varepsilon_{\theta} = \theta_{пр} + \frac{\Delta H}{L_{пр}}$, рассматриваемым в дальнейшем выходной координатой объекта управления. Исходя из Рис. 2.5.2.3.1, ошибка, воспринимаемая летчиком, будет нулевой только в том случае, если самолет движется по заданной траектории, например, глиссаде, и вектор скорости направлен вдоль глиссады. В общем случае процесс отслеживания высоты полета по прогнозной информации может быть представлен в виде схемы на рис. 2.5.2.3.3.

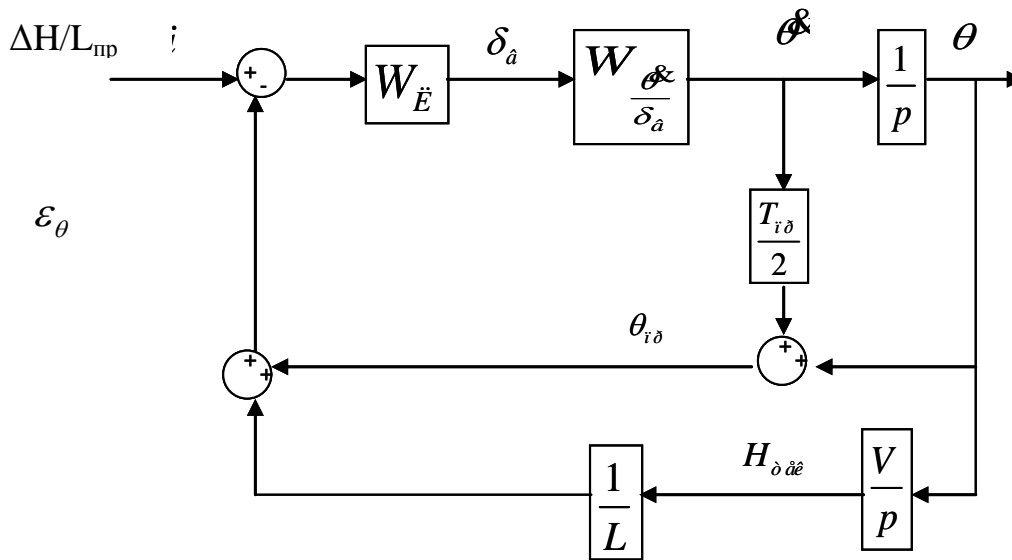


Рис 2.5.2.3.3. Структурная схема алгоритма отслеживания высоты полета по прогнозной информации.

Отсюда можно получить следующие выражения для передаточной функции объекта управления:

$$W_c = \frac{\varepsilon_\theta(p)}{\delta_\varepsilon(p)} = \frac{K_c \left(T_{np} p^2 + 2p + \frac{2}{T_{np}} \right)}{2p^2 (p^2 + 2\xi\omega p + \omega^2)}.$$

По сути, сформирован директорный сигнал, позволяющий повлиять на нули передаточной функции объекта управления и, таким образом, оптимизировать динамику самолета для целевого режима пилотирования, а также осуществить требуемый переход к одноконтурной системе управления.

На рисунках 2.5.2.3.4 (маловысотный полет в режиме огибания рельефа местности) и 2.5.2.3.5 (посадка на полосу) показан пример внешнего вида прогнозной индикации, совмещенной с изображением внекабинного пространства.

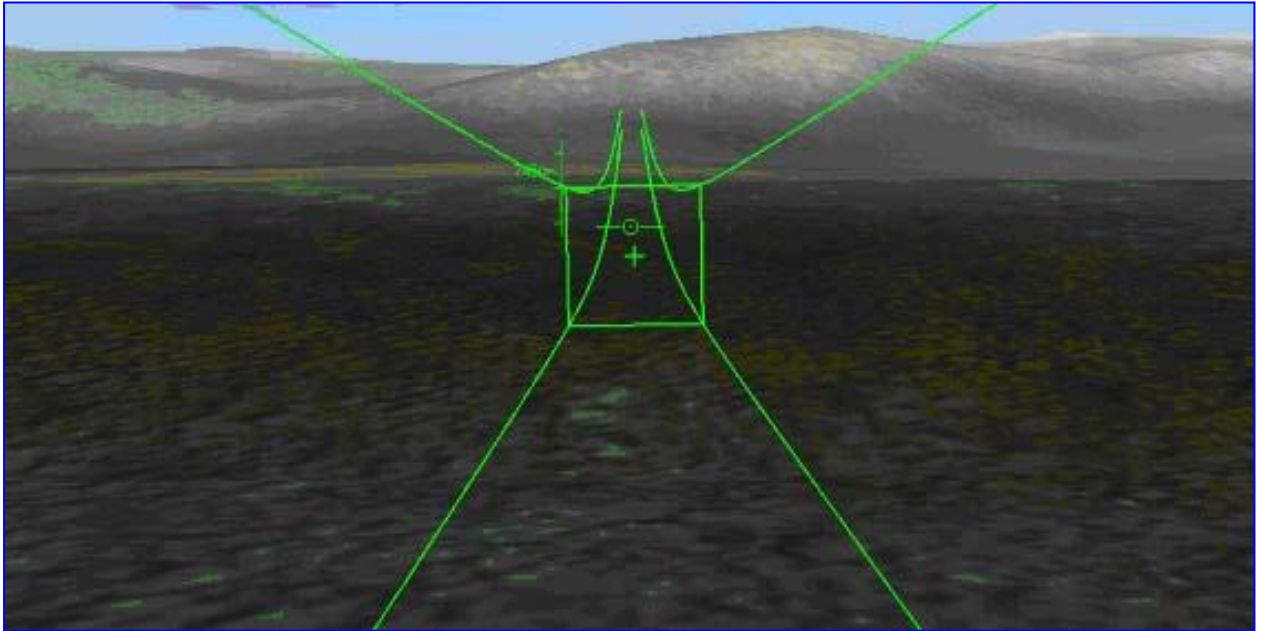


Рис. 2.5.2.3.4. Вид прогнозной индикации из кабины.

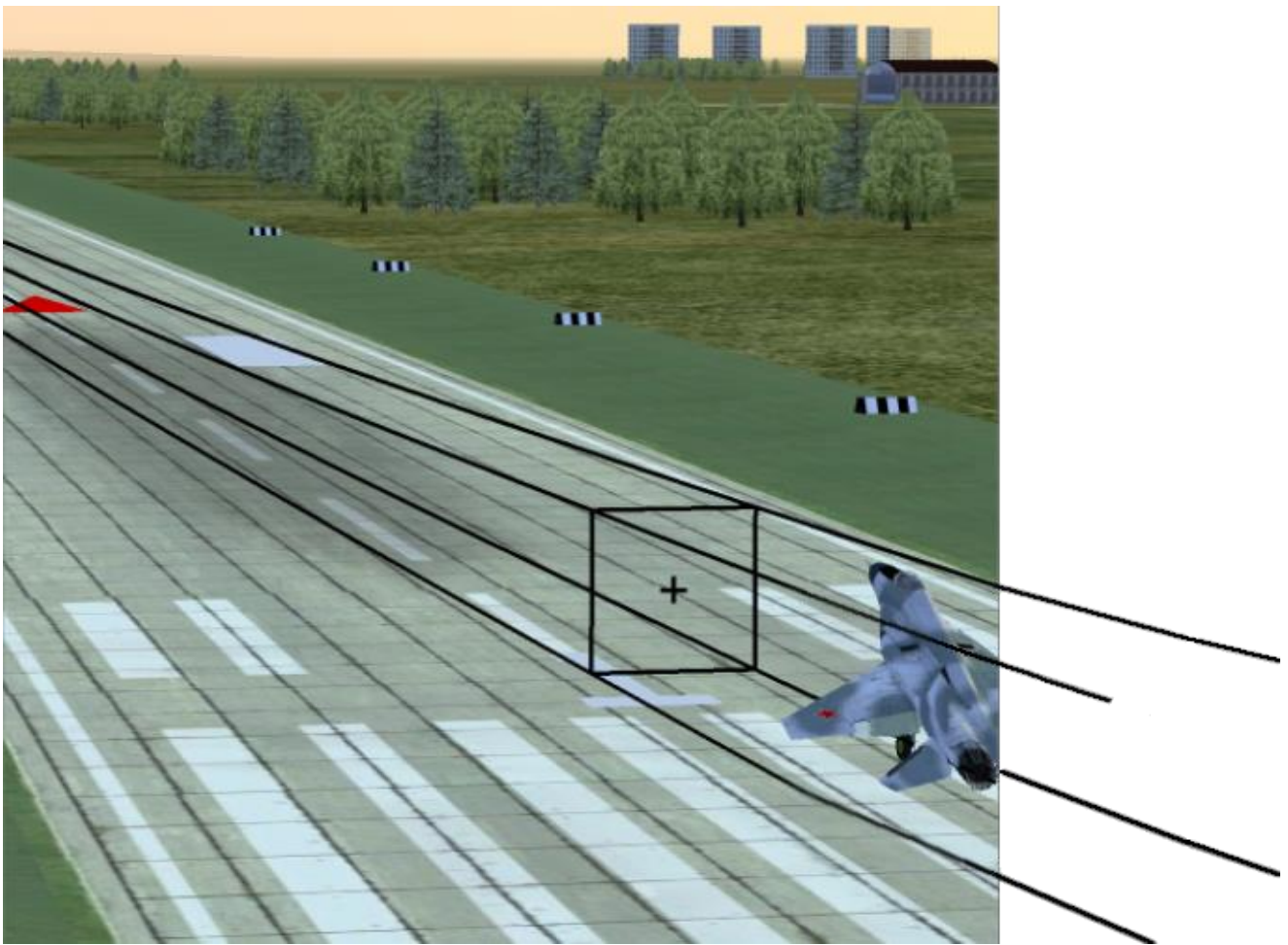


Рис. 2.5.2.3.5. Вид прогнозной индикации с внешней камеры.

2.6. Вычислительный комплекс

2.6.1. Назначение

Вычислительный комплекс (ВК) представляет набор оборудования, производящий вычисления и сопряжение в единое информационное пространство компонентов многофункциональной наслемной системы.

ВК обеспечивает:

- общее функционирование МНС;
- синтез в реальном масштабе времени изображений дополненной реальности и системы целеуказания и индикации;
- приём и обработку информации от системы отслеживания направления взгляда;
- приём и обработку информации от системы отслеживания положения головы;
- имитацию работы бортовых систем и оборудования в соответствии с имитируемым режимом;
- информационный обмен с вычислителями пилотажного стенда;
- прием и передачу информационного кадра в НВУ;
- формирование напряжения питания для НВУ.

2.6.2. Состав и схема вычислительного комплекса

Вычислительный комплекс МНС включает в себя:

- блок обработки информации (БОИ);
- вычислитель дополненной реальности МНС (ВДР).

Схема вычислительного комплекса МНС

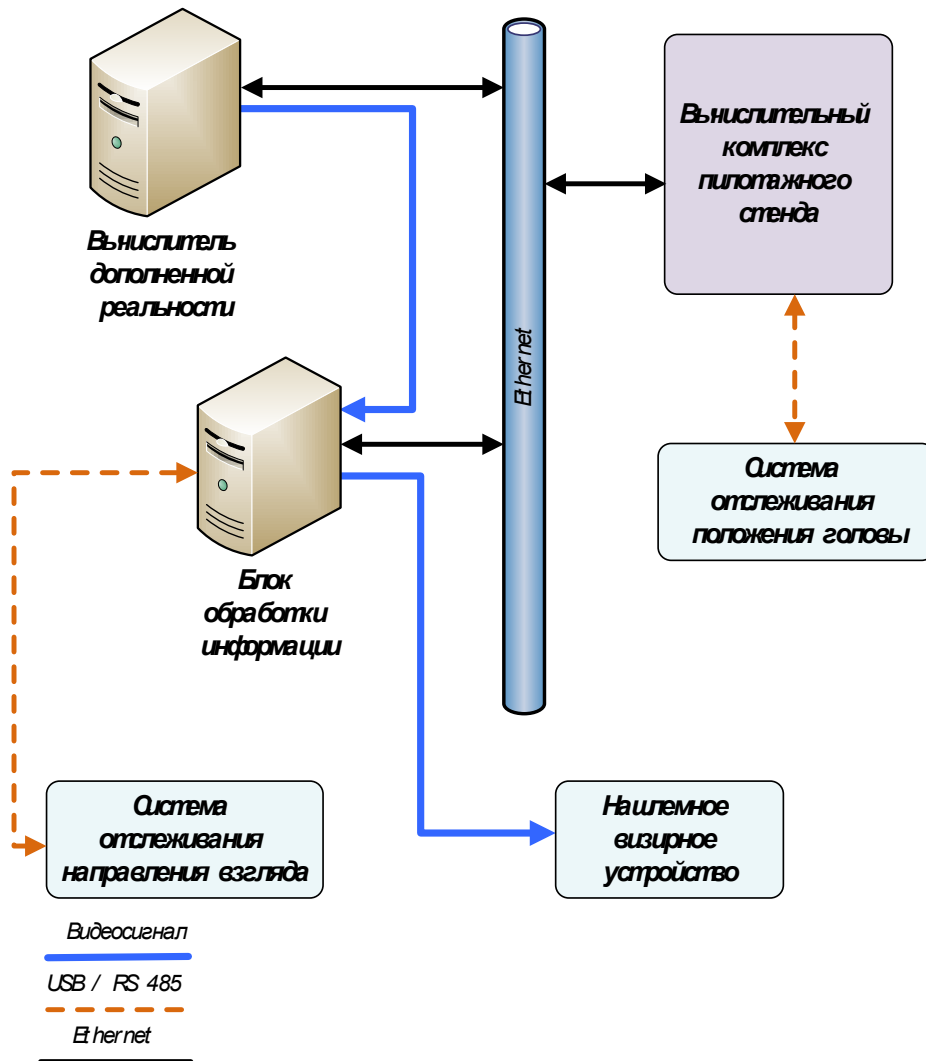


Рис. 2.6.2.1.

2.6.3. Аппаратное обеспечение

В таблице 2.6.3.1 приведены минимальные технические характеристики для компьютеров, входящих в состав вычислительного комплекса МНС.

Таблица 2.6.3.1.

	Состав вычислительного комплекса МНС	
Вычислители	ВДР	БОИ
Кол-во	1	1
ОС	Win 7/8.1/10 Pro x64	Win 7/8.1/10 Pro x64
Жесткие диски Serial ATA	2 ТБ	1 ТБ
DVD+/-RW	+	+
Оперативная память	8 ТБ	4 ТБ
Звуковая карта	интегрированная	интегрированная
Видеокарта	GTX 980, 4ГБ	GT 710, 2ГБ
Процессор	Intel Core i5	Intel Core i3
Материнская плата	ASUS z97	ASUS z97

	Назначение вычислителей
ВДР	Генерация сцен дополненной реальности и целеуказания.
БОИ	Сопряжение с ВДР, НВУ и системой отслеживания направления взгляда.

Раздел 3. Совместимость МНС с пилотажным стендом со стереоскопической системой визуализации

3.1. Совместимость МНС с системой визуализации пилотажного стенда со стереоскопической системой визуализации

Пилотажный стенд снабжен стереоскопической системой визуализации. Графические вычислители, формируемые изображение внешней обстановки на экране моделирующего комплекса производят отображение трехмерной информации (3d-модели элементов окружающего пространства) в двумерную оконную систему координат.

Для совместимости индикации, формируемой на МНС с системой визуализации моделирующего комплекса осуществляется синтез изображения, руководствуясь принципами и правилами построения изображения на экране пилотажного стенда.

Для задания различных преобразований объектов сцены, в данном случае окружающего пространства, отображаемого на экране пилотажного стенда, используются операции над матрицами. При этом различают типы матриц: видовая и проекций. Все они имеют размерность 4×4 . Видовая матрица определяет преобразования объекта в мировых координатах, такие как параллельный перенос, изменение масштаба и поворот. Матрица проекций задает как будут проецироваться трехмерные объекты на плоскость экрана (в оконные координаты).

Видовое преобразование

К видовым преобразованиям будем относить перенос, поворот и изменение масштаба вдоль координатных осей. Для проведения этих операций достаточно умножить на соответствующую матрицу каждую вершину объекта и получить измененные координаты этой вершины:

$$(x', y', z', 1)^T = M * (x, y, z, 1)^T$$

где M – матрица видового преобразования. Перспективное преобразование и проектирование производится аналогично.

Проекция

Существуют ортографическая (параллельная) и перспективная проекция. В нашем случае будет использоваться перспективная проекция.

Перспективная проекция задает усеченный конус видимости в левосторонней системе координат.

Область вывода

После применения матрицы проекций на вход следующего преобразования подаются так называемые усеченные (clip) координаты, для которых значения всех компонент $(x_c, y_c, z_c, w_c)^T$ находятся в отрезке $[-1,1]$. После этого находятся нормализованные координаты вершин по формуле:

$$(x_n, y_n, z_n)^T = (x_c/w_c, y_c/w_c, z_c/w_c)^T$$

Область вывода представляет из себя прямоугольник в оконной системе координат. Размеры оконной системы координат определяются текущими размерами окна приложения.

Точно по таким же принципам строится изображение индикации, отображаемое на мониторе МНС.

На вычислителе, производящем генерацию изображения индикации по разработанным в МАИ алгоритмам, в реальном масштабе времени строится трехмерная модель коридора, прогнозного окна и меток.

Текущая матрица принимается единичной. Далее происходит умножение текущей матрицы на матрицу, которая перемещает объект (каждый элемент индикации) на значения x , y и z , или же перемещает локальную систему координат на те же значения. После этого текущая матрица умножается на матрицу, которая поворачивает объект (или локальную систему координат).

После происходит умножение текущей матрицы на проекционную матрицу. Её параметры имеют следующие значения:

- left, right - координаты левой и правой вертикальных отсекающих плоскостей.
- bottom, top - координаты верхней и нижней горизонтальных отсекающих плоскостей.
- near, far - координаты "ближней" и "дальней" плоскостей отсечения.

(Если объект находится за плоскостью отсечения, то он не отображается при воспроизведении).

Проекционная матрица имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \frac{2 \text{ near}}{\text{right-left}} & 0 & A & 0 \\ 0 & \frac{2 \text{ near}}{\text{top-bottom}} & B & 0 \\ 0 & 0 & C & D \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Значения A, B, C, D рассчитываются следующим образом:

$$A = \frac{\text{right} + \text{left}}{\text{right} - \text{left}} \quad C = -\frac{\text{far} + \text{near}}{\text{far} - \text{near}}$$

$$B = \frac{\text{top} + \text{bottom}}{\text{top} - \text{bottom}} \quad D = -\frac{2 \text{ far near}}{\text{far} - \text{near}}$$

Параметры (left, bottom, near) и (right, top, near) определяют точки на "ближней" плоскости отсечения, которые проецируются на нижний левый и правый верхний углы окна соответственно, предполагается, что точка, откуда производится наблюдение, расположена в точке с координатами (0,0,0). Параметр far определяет положение "дальней" плоскости отсечения.

Параметры far и near должны всегда быть положительными.

Далее должна быть определена область окна, в которую будет отображен результат вычислений.

Преобразования реальных x_{nd} и y_{nd} координат в оконные координаты происходят следующим образом:

$$x_w = (x_{nd} + 1) \left[\frac{\text{width}}{2} \right] + x$$

$$y_w = (y_{nd} + 1) \left[\frac{\text{height}}{2} \right] + y$$

где x_w и y_w - конечные оконные координаты, x_{nd} , y_{nd} - реальные координаты, x , y - координаты начала отсчета в оконной системе координат, width, height - ширина и высота окна.

Полученное изображение транслируется на монокль МНС.

Так как трехмерные модели коридоров, которые отображаются на МНС, формируются в системе координат, связанной с виртуальной поверхностью Земли, а сформированное с их помощью изображение передается на монокль МНС, система

координат которого связана с головой пилота, то при формировании видовой матрицы используются данные о положении головы в системе координат, связанной с кабиной. А именно: координаты опорных вершин коридора сначала переводят из системы координат, связанной с виртуальной поверхностью Земли, в систему координат, связанную с кабиной моделируемого самолета, затем в систему координат, связанную с головой пилота, используя данные от системы отслеживания положения головы пилота, и в заключение выполняется перспективное преобразование, преобразование в оконные координаты и вывод изображения на монокуляр МНС.

3.2. Структурная схема взаимодействия МНС и пилотажного стенда со стереоскопической системой визуализации

Система электропитания предназначена для обеспечения надежного и безотказного питания потребителей переменного и постоянного тока моделирующего Комплекса РВ.

Первичное электропитание моделирующего комплекса производится от промышленной сети переменного 3-х фазного тока напряжением 380В/220В частотой 50Гц.

Потребляемая мощность оборудованием моделирующего комплекса составляет не более 5кВт.

Потребителями электроэнергии моделирующего Комплекса РВ являются:

- кабина комплекса (КК);
- система визуализации (СВ);
- вычислительный комплекс (ВК);
- рабочее место инструктора (РМИ).

Структурная схема электропитания моделирующего Комплекса РВ и МНС (вычислителя и блока связи) представлена на рис. 3.3.1.

Система электропитания моделирующего комплекса включает:

- распределительный щит электропитания с автоматами защиты и аппаратурой коммутации, управления и сигнализации;

- источники бесперебойного питания (ИБП) с системой аварийного отключения;
- первичные преобразователи напряжения $\sim 220\text{В}/=27\text{В}$, $\sim 220\text{В}/\sim 36\text{В}$ 400Гц;
- вторичные преобразователи напряжения $=27\text{В}/=5\text{В}$;
- распределительную кабельную сеть.

Структурная схема питания компонентов МНС при интеграции с Комплексом РВ

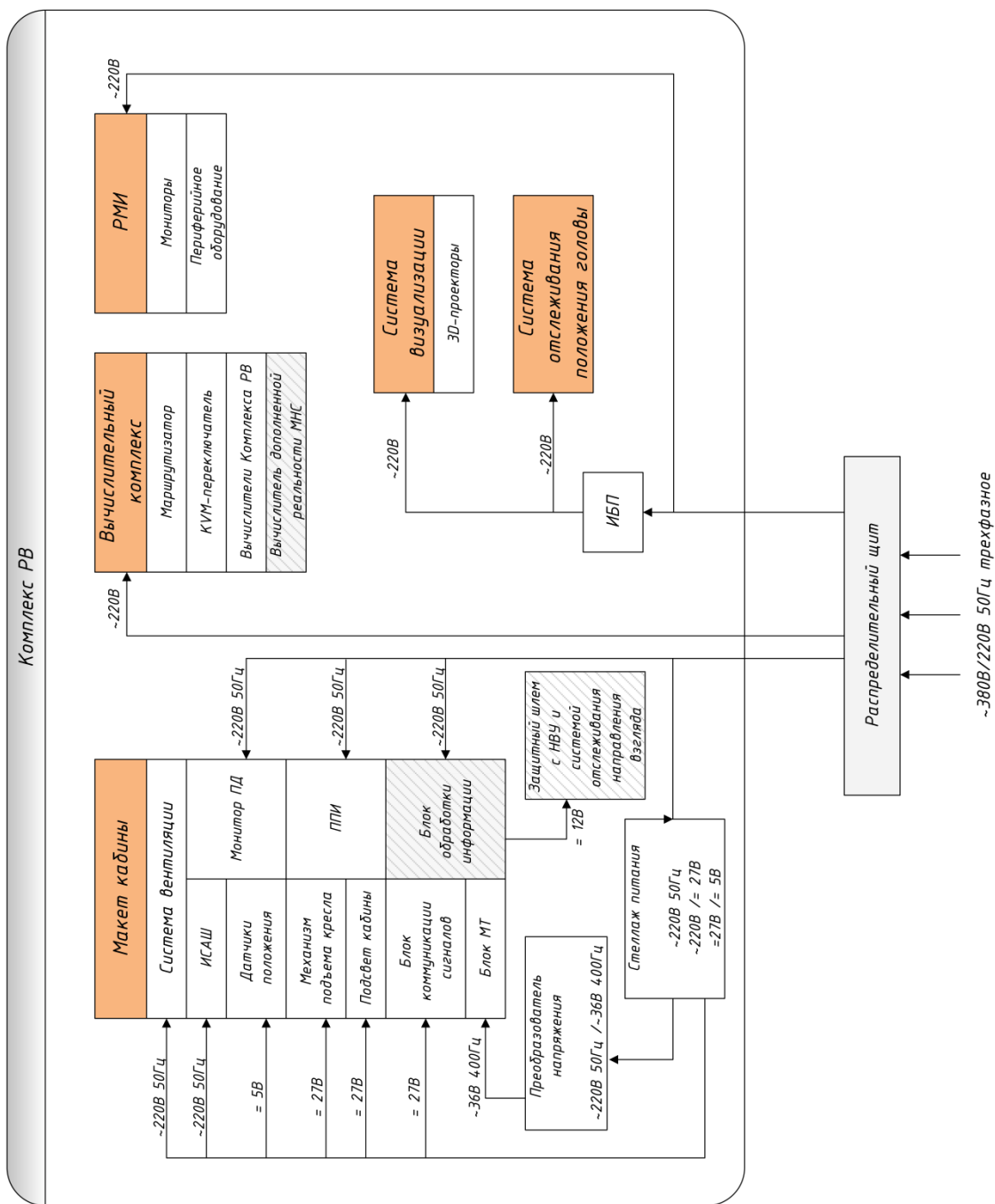


Рис. 3.3.1.

Первичные и вторичные преобразователи напряжения кабины комплекса (КК) размещаются в отдельной стойке питания (СП).

Потребители электроэнергии подразделяются на потребителей напряжения переменного тока и постоянного тока.

В состав потребителей напряжения переменного тока 220В частотой 50Гц кабины комплекса (КК) входят:

- сенсорный монитор для имитации приборной доски (монитор ПД), потребляемая мощность не более 400ВА;
- оборудование системы вентиляции, потребляемая мощность не более 200ВА;
- проекционная аппаратура системы индикации (ППИ), потребляемая мощность не более 200ВА;
- проекционная аппаратура визуализации, потребляемая мощность не более 250ВА;
- система имитации акустических шумов (ИСАШ), потребляемая мощность не более 300ВА;
- БОИ МНС, потребляемая мощность не более 200ВА;
- первичный преобразователь напряжения $\sim 220\text{В}/=27\text{В}$, потребляемая мощность не более 400ВА.
- преобразователь напряжения $\sim 220\text{В } 50\text{Гц}/\sim 36\text{В } 400\text{Гц}$ (для питания механизмов перемещения типа МТ-16), потребляемая мощность не более 1600ВА;

В состав потребителей напряжения постоянного тока 27В КК входят:

- механизм регулировки кресла пилота по высоте, потребляемая мощность не более 100Вт;
- система освещения бортовых пультов и оборудования, потребляемая мощность не более 30Вт;
- блок коммутации сигналов управления, потребляемая мощность не более 10Вт;
- вторичный преобразователь напряжения $=27\text{В}/=5\text{В}$, потребляемая мощность не более 60Вт для питания датчиков положения;

В состав потребителей напряжения переменного тока $\sim 220\text{В } 50\text{Гц}$ системы визуализации (СВ) входят 2 проектора, потребляемая мощность не более 2кВА.

В состав потребителей напряжения переменного тока $\sim 220\text{В}$ 50Гц вычислительного комплекса (ВК) и рабочего места инструктора (РМИ) входят компьютеры с периферией, потребляемая мощность не более 16кВА.

Распределительный щит электропитания обеспечивает защиту распределительной кабельной сети в случае короткого замыкания и значительного превышения действующих значений тока, обеспечивает защиту обслуживающего персонала при возникновении утечек на землю, оборудован системой сигнализации наличия напряжения переменного тока $\sim 380\text{В}/220\text{В}$ частотой 50 Гц.

Раздельное управление электропитанием потребителей комплекса осуществляется с распределительного щита электропитания выключателями:

- питание КК;
- питание СВ;
- питание ВК;
- питание РМИ.

Раздел 4. Обоснование выбора технического решения

4.1. Обоснование принципов построения прогнозной индикации

Анализ особенностей пилотирования самолета при выполнении задач траекторного управления показывает, что управление характеризуется высоким порядком астатизма объекта управления в продольном канале (2-ой порядок) и в боковом канале (3-й порядок), неустойчивость самолета по скорости (при посадке на ограниченную площадку), а также повышенные требования к точности. Управление таким объектом требует от летчика чрезмерной загруженности, введения им опережающих действий, а также образование дополнительных контуров и каналов. Такой характер действий, хотя и позволяет осуществлять устойчивый процесс пилотирования, но требует от летчика постоянного распределения внимания, что в итоге снижает точность.

Было показано, что для устранения этих недостатков необходимо создание таких средств автоматизации, при использовании которых пилотирование самолета будет осуществляться:

- в одноконтурной системе самолет-летчик, при котором практически исключается необходимость функционирования летчика в нескольких контурах и каналах управления;
- с динамикой самолета в этой одноконтурной системе, обеспечивающей наилучшее качество выполнения целевой задачи.

Для этих целей предлагается использовать систему отображения информации (СОИ) для улучшения динамики объекта управления, позволяющую перейти от 2-х контурной к одноконтурной системе, одновременно обеспечив хорошую динамику объекта управления и высокую точность выполнения задачи пилотирования.

В качестве системы отображения информации предлагается использование прогнозной информации о положении самолета через время $T_{пр}$, а также отобразить туннель, охватывающий программную траекторию и позволяющий летчику прогнозировать ее изменение, а также судить о текущем рассогласовании по высоте.

Выбор времени прогноза осуществлялся исходя из критерия минимизации дисперсии ошибки выполнения целевой задачи (посадки, облета рельефа местности, дозаправки в полете) путем математического моделирования, а также путем проведения экспериментальных исследований на рабочей станции.

Разработанная СОИ должна реализовываться с использованием современных средств представления летчику полетной информации.

В практике создания боевой авиации уже давно используются индикаторы на лобовом стекле (ИЛС).

Конструктивно ИЛС выполнен в виде полупрозрачного стекла, расположенного под углом к линии визирования глаз в поле зрения лётчиков. На данное стекло проецируется изображение различных параметров (со своими шкалами и осями), необходимых для реализации точного ручного управления траекторией самолёта (величины скорости полёта, вертикальной скорости, угла тангажа, местного горизонта, величины продольного ускорения, углов крена и курса, и т.д.).

Объединение ИЛС'а с бортовыми вычислительными средствами позволяет расширить возможности его использования, передавать изображения в новых формах.

Дальнейший этап развития технических средств передачи информации связан с созданием и использованием для военной авиации наשלменных систем индикации. Они предназначены для передачи летчику целеуказаний, необходимых для ведения воздушного боя и поддерживают постоянный контакт глаза летчика с передаваемой информацией при любом положении головы. Настоящая работа посвящена созданию нового поколения наשלменной индикации, содержащей прогнозную информацию. Это позволяет существенно расширить круг решаемых с ее помощью задач пилотирования, дополнив посадкой, посадкой на палубу авианосца, облетом рельефа местности, дозаправкой.

Индикацию предлагается проецировать на внешнюю визуальную обстановку по технологии дополненной реальности.

4.2. Анализ зарубежного опыта создания и текущего состояния систем дополненной реальности

Основным узлом НСЦИ является нашлемный блок индикации (НБИ), расположенный непосредственно на защитном шлеме и отвечающий за вывод коллимированного изображения прицельно-навигационной информации.

Нашлемный блок индикации состоит из:

- дисплейной матрицы – для отображения проецируемой индикационной информации;
- проекционной оптической системы – для создания коллимированного изображения индикационной информации в поле зрения летчика;
- интерфейсной части – для связи с блоком управления и приема/передачи информации.

Проекционные системы бывают монокулярными (изображение выводится на один глаз) и бинокулярными (на два глаза).

В отечественной истребительной авиации применяются нашлемные системы целеуказания и индикации монокулярного типа:

- «Сура-М» (ЦКБ «Арсенал», Украина) на самолетах МиГ-29СМТ(УБ) и самолетах типа Су-27 и Су-30 – изображение проецируется на откидной окуляр (монокль) перед правым глазом летчика;
- «Topsight-E» («Thales», Франция) на самолетах МиГ-29КР/КУБР – изображение проецируется на прозрачный защитный щиток шлема летчика.

За рубежом уже приобретен опыт разработки применения нашлемных систем бинокулярного типа:

- «HIDSS» («Kaiser Electronics», США) для вертолета RAH-66 Comanche;
- «Rotary Wing HMD» («BAE Systems», Англия) для истребителя Eurofighter «Typhoon».

Основной особенностью проекционной системы НБИ является наличие оптического устройства сведения, на котором происходит наложение излучения от

дисплейной матрицы и светового потока из окружающего пространства перед глазами летчика.

Проекционные системы можно разделить на два типа:

- в качестве оптического сумматора – подложки для индикации – используется выносной элемент, расположенный перед светофильтром защитного шлема и являющийся окуляром проекционной системы,
- в роли оптического сумматора выступает сам светофильтр, представляющий собой сложный оптический элемент и являющийся частью проекционной системы.

Французская фирма «THALES» использует в конструкции шлема летчика защитный светофильтр сложной асферической формы, являющийся частью оптической проекционной системы. Напротив глаза летчика на светофильтре нанесено светоделительное покрытие, которое организует сведение световых пучков и, одновременно, является окуляром для формирования выходного зрачка. Угол поля зрения составляет $\sim 200^\circ$. Помимо необходимости изготовления индивидуального светофильтра, а также сложности самого процесса изготовления, в этой схеме расположение линз заметно затеняет обозреваемое летчиком пространство.

Ввиду невозможности, на текущий момент, изготовления защитного забрала асферической формы в нашей стране, рассматривался вариант разработки проекционной системы на основе сферического светофильтра. Но проблема данных проекционных систем заключается в том, что при больших углах падения излучения на поверхность оптического устройства сведения относительно нормали велики оптические aberrации, а это, в свою очередь, сильно ухудшает качество изображения.

Таким образом, единственным возможным на данный момент вариантом, обеспечивающим адекватное качество изображения, является проекционная система, использующая в качестве оптического сумматора выносной элемент, расположенный перед светофильтром защитного шлема.

4.3. Сравнительная оценка монокулярного и бинокулярного способов представления информации НСЦИ

Для обоснования выбора способа предъявления летчику информации от НСЦИ использовались результаты исследований, проведенных специалистами ГНИИИ ВМ МО РФ, в которых приведена оценка эффективности зрительного восприятия информации при использовании монокулярного и бинокулярного способов предъявления индикации на экране НСЦИ.

Эффективность зрительного восприятия оценивалась по времени восприятия индикации и количеству ошибок, допущенных при определении положения тестового изображения (кольцо с разрывом).

Оценка эффективности действий летчика при использовании НСЦИ проводилась по показателям: точности пилотирования (средние значения среднеквадратические отклонения от заданных значений параметров полета).

Для оценки качества пилотирования при использовании монокулярного и бинокулярного способов предъявления пилотажной информации на экране НСЦИ использовались показатели качества выдерживания заданных параметров полета при использовании монокулярного и бинокулярного способов предъявления информации на экране НСЦИ.

Данные исследований представлены в таблице 4.3.1-

Таблица 4.3.1. Среднее время зрительного восприятия при монокулярном и бинокулярном способах предъявления информации.

Условия зрительной деятельности	Монокуляр	Бинокуляр
	t, с	t, с
1. Кольцо предъявляется на НСЦИ - внешняя визуализация выключена (белый экран)	0,70	0,71
2. Кольцо предъявляется на НСЦИ - на экране визуализации предъявляется изображение с периодической текстурой	1,27	0,90
3. Кольцо на фоне реальной местности	1,98	2,81

предъявляется на НСЦИ - на экране визуализации предъявляется изображение реальной местности		
--	--	--

Проведенные исследования позволили сделать специалистам ГНИИИ ВМ МО РФ следующие выводы:

1. Эффективность восприятия информации при использовании НСЦИ зависит от характеристик визуальной обстановки, психофизиологических особенностей зрительного анализатора человека и способа предъявления информации на экране НСЦИ.

2. При использовании монокулярного и бинокулярного способов предъявления информации в условиях проекции изображения НСЦИ на слабоструктурированный внешний фон (безоблачное небо), характерный для выполнения задач «воздух-воздух» не выявлено существенных различий эффективности зрительного восприятия.

3. Испытатели отметили наличие дискомфорта при использовании как монокулярного, так и бинокулярного вариантов, при этом монокулярный вариант признан более удобным в использовании, поскольку оставляет поле зрения одного из глаз полностью свободным от дополнительных механических элементов.

4.4. Оценка задачи нанесения оптических покрытий с требуемыми характеристиками

Решение задачи наложение излучения от дисплейной матрицы и светового потока из окружающего пространства перед глазами летчика требует нанесения отражающего оптического покрытия на поверхность выносного элемента перед светофильтром защитного шлема летчика.

Отражающее покрытие является коллимирующим зеркалом в оптической схеме проекционной системы, передающей изображение от дисплейной матрицы в поле зрения летчика и должно быть согласовано с её спектром излучения.

Максимум излучения матрицы находится в диапазоне длин волн от 510 нм до 540 нм (рис. 4.4.1.).

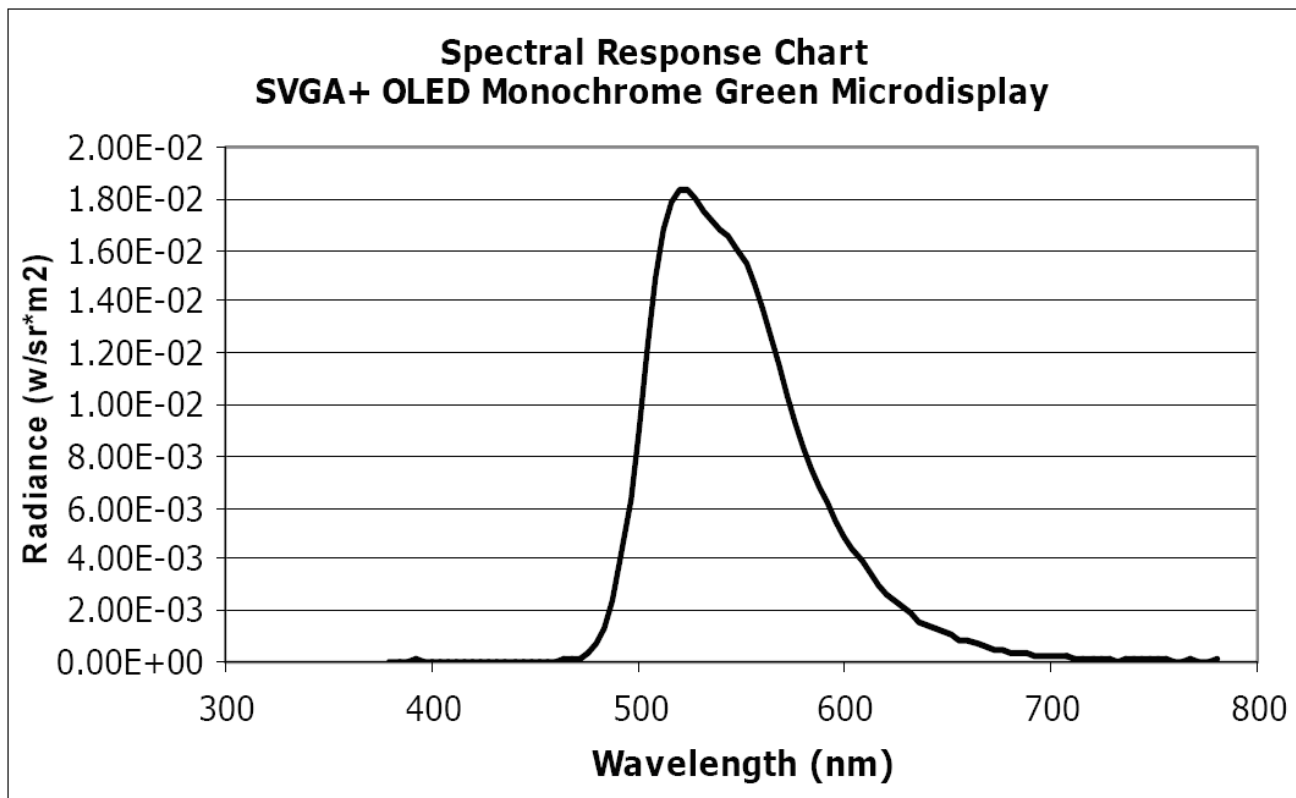


Рис. 4.4.1. Спектр излучения OLED матрицы.

В диапазоне длин волн излучения OLED дисплея должно быть минимизировано отражение от внешней поверхности светофильтра шлема, чтобы уменьшить контраст паразитного изображения матрицы.

Специфика нанесения диэлектрических покрытий на полимерные материалы состоит в том, что, в отличие от уже отработанных технологий нанесения покрытий на минеральные материалы, здесь необходимо использовать низкие температуры в вакуумных камерах, наносить дополнительные слои и использовать технологические приемы, повышающие адгезию поверхности полимеров, увеличивающие гидрофобность и защищающие их от механических воздействий. В современных установках диэлектрические покрытия получают методом вакуумного напыления с применением сложных технологических процессов и пленкообразующих веществ высокой чистоты.

Процесс нанесения покрытий можно разделить на два этапа:

1) отрабатываются технологии получения отражающих и просветляющих покрытий на полимерных и стеклянных образцах с характеристиками, близкими к заданным.

2) отрабатываются режимы нанесения отражающих покрытий с коэффициентом отражения порядка 20% в максимуме и спектральным распределением, которые бы максимально совпадало со спектром излучения матрицы.

Также необходимо провести работы по климатическому воздействию на полученные экспериментальные покрытия. Стандартной процедурой является помещение образцов с покрытиями в водяную баню и выдерживание в ней в течение 24 часов. После этого покрытие осматривается визуально и проверяется сохранение его оптических качеств.

4.5. Выбор материала для бинокулярного фильтра

В качестве материала для изготовления бинокулярный фильтр выбрано оргстекло, так как оно обладает следующими свойствами:

- превосходная устойчивость к атмосферным воздействиям;
- стойкость к механическим нагрузкам, более чем на порядок превосходящая прочность силикатных стекол;
- простота обработки;
- высокая жесткость поверхности;
- легкий вес - в два раза легче стекла;
- в 11 раз устойчивее к излому, по сравнению со стеклом;
- низкая температура термоформирования, позволяющая изготавливать изделия практически любой конфигурации.

Оргстекло является одним из самых популярных пластиков и находит применение во многих областях нашей жизни — строительстве и дизайне, в автомобильной, авиационной, сантехнической, автомобильной промышленности. Оно позволяет пропускать до 92% видимого света — больше, чем любой другой полимерный материал и в отличие от стекла намного прочнее.

Для изделий авиационной промышленности России применяются оргстекла следующих марок СО-95-А, СО-95-К, СО-120-А, СО-120-К, АО-120, СО-120 в соответствии с ГОСТ 10667-90.

Условные обозначения марок: из начальных букв «Стекло органическое» – «СО», последующих цифр, указывающих значение температуры размягчения, и буквы, обозначающей область применения стекла: «А» – авиационное: для остекления самолетов и вертолетов; «К» – конструкционное: для машиностроения, судостроения, приборостроения и других отраслей промышленности в качестве конструкционного материала.

За рубежом для этих целей специально разработаны следующие материалы:

PLEXIGLAS[®] GS 249: высококачественное акриловое стекло, сертифицированное по MIL-P-8184, тип I, класс 2.

PLEXIGLAS[®] GS 245: литое акриловое стекло с прекрасными оптическими свойствами.

PLEXIGLAS[®] GS 241: литое акриловое стекло, отвечающее высоким оптическим требованиям по остеклению летательных аппаратов, для которого не предписано использование материалов, сертифицированных согласно конкретным авиационным стандартам.

4.6. Сравнительная оценка стереоскопических технологий для использования с МНС

На данный момент известны 4 основных технических решения:

1. Пассивное поляризационное разделение passive stereo (линейная и круговая поляризация)

Технология поляризационного разделения предусматривает использование поляризационных фильтров для левого и правого глаза.

В технологии поляризационного разделения два изображения разделяются с помощью поляризации света (линейная поляризация или круговая поляризация). Они проецируются на специальный экран с серебряным покрытием, не меняющий поляризации падающего света. Направления поляризации фильтров подобраны таким образом, что каждый глаз видит только предназначенное для него изображение.

Недостатком данного метода является:

- удвоенное количество генераторов изображения и проекторов;

- смещение каналов (когда левый глаз видит частичное изображение, формируемого для правого глаза и наоборот);
- невозможность использования многопроекторных решений (невозможность реализации сведения разных каналов);
- принципиальная невозможность использования неплоских экранов.

К достоинствам метода можно отнести:

- достаточно хорошую цветопередачу;
- обеспечение достаточно комфортного восприятия изображения;
- возможность отслеживания зрачка с помощью ИК-камер.

2. Пассивное Infitec стерео, Passive Infitec (пассивное мультихроматическое разделение)

Технология основана на цветоделении внутри видимого спектра изображений для левого и правого глаза. В отличие от обычного анаглифа, разделение происходит не на красный и сине-зеленый цвета, а на отдельные перемежающиеся полосы внутри спектральных диапазонов каждого из основных трех цветов. Ширина и расположение полос подобраны таким образом, чтобы обеспечить четкое разделение каналов стереоизображения и свести к минимуму искажение цветов. Преимуществами являются наиболее качественное разделение изображений для левого и правого глаза (практически отсутствует смещение каналов в передаваемом изображении), а также наиболее высокий из рассматриваемых технологий уровень комфортности восприятия изображения, в особенно при сравнении с активными технологиями. Недостатками являются невозможность использования неплоских экранов и необходимость использования оптических схем, предполагающих наличие отдельного проектора для каждого из глаз и, вследствие этого, удвоенное количество генераторов изображения. Также технология не обеспечивает достаточное качество сшивки нескольких стереоскопических (двухпроекторных) проекционных каналов.

Возможность реализации данной технологии основана на точном нанесении сложных структур многослойных спектроразделительных покрытий на поверхность стекла, что может оказаться препятствием при решении одной из задач настоящего проекта – изготовлении бинокулярного фильтра для МНС, имеющего достаточно

сложную форму и значительную кривизну. Еще одним препятствием при выборе в пользу данной технологии может стать проблема, связанная с необходимостью обеспечить «окно» в фильтре для прохождения света инфракрасной части спектра, чтобы иметь возможность отслеживания зрачка с помощью ИК-камер.

3. Активное стерео – Active stereo (основана на использовании затворных жидкокристаллических очков)

В 3D-технологии затворного разделения изображения для левого и правого глаза проецируются на экран по очереди и для наблюдения используются 3D очки, стекла которых затемняются синхронно с подаваемым изображением.

К недостаткам можно отнести быструю утомляемость глаз за счет так называемых «жидкокристаллических шторок» которые закрываются и открываются на очках с частотой 60 герц, что требует от человека значительного напряжения зрительной системы (подсознательная аккомодация (фокусировка) глаза попеременно то на «шторке», то на экране).

В рамках настоящего проекта недостатком технологии также является сложность нанесения качественной и стойкой к внешним воздействиям жидкокристаллической плёнки на поверхность достаточно большой площади и значительной кривизны, необходимость прокладки отдельного электропитания и сигнала синхронизации кадров. Не менее серьезной представляется проблема отслеживания зрачка при постоянно мерцающей в режиме работы «шторке».

4. Активное Infitec стерео, Active Infitec (активное мультихроматическое разделение)

Данная технология, в отличие от пассивного варианта Infitec, обеспечивает использование одного источника для обоих каналов стереоизображения за счет переключения между фильтрами внутри проектора, что позволяет организовать стереоскопическую проекцию на неплоские экраны (цилиндрические и сферические). Также становится возможной реализация сшивки нескольких стереоканалов как на плоских, так и на искривленных экранов.

Отсутствие мерцающих «шторок» обеспечивает постоянную аккомодацию глаза на экран, что приводит к значительно меньшей утомляемости глаз по

сравнению с технологией активного затворного стерео, хотя и несколько уступает пассивному варианту Infitec.

Недостатки, связанные с реализацией настоящего проекта, те же, что и у пассивного варианта данной технологии – значительные сложности при изготовлении бинокулярного фильтра с требуемыми характеристиками.

Окончательное решение в пользу пассивной круговой поляризации в качестве стереоскопической технологии для МНС было принято по результатам исследований по следующим основным направлениям:

- технологическая реализуемость различных типов оптических покрытий на поверхности бинокулярного фильтра, имеющего достаточно сложную сферическую форму значительной кривизны (идентичную светофильтру защитного шлема);

- степень пропускания ИК-сигнала различными типами фильтров, а также степень влияния выделенного для прохождения света инфракрасной части спектра «окна» в бинокулярном фильтре на воспроизведение стереоскопического эффекта.

Выводы

Настоящая работа посвящена созданию нового поколения нашлемных систем индикации, отображающих летчику прогнозную информацию о траектории движения самолета. Это позволяет существенно расширить круг решаемых с их помощью задач пилотирования, включив в этот список посадку на ВПП (в том числе ограниченную, как палуба авианосца), полет в режиме следования рельефу местности, дозаправку в воздухе, а , в перспективе, и целый ряд других.

Все эти задачи выполняются в замкнутой системе самолет-летчик и требуют обеспечения высокой точности. Особенностью данной системы является существенное влияние переменных задачи пилотирования (динамики объекта управления, дисплея и других) на поведение летчика и характеристики его реакции. В связи с этим решение задачи проектирования любого из элементов технической части системы самолет-летчик требует знания закономерностей поведения летчика и методов исследования этой системы.

Данная работа выполнена в рамках и за счет финансовой поддержки проекта «Разработка многофункциональной нашлемной системы дополненной реальности с трехмерной прогнозной индикацией для выполнения задач точного управления» (Договор № 02.G25.31.0209 от 27 апреля 2016 года между АО «РСК МиГ» и Министерством образования и науки Российской Федерации об условиях предоставления и использования субсидии на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполненного с участием ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)» и ООО «КОС».