

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 Анализ структуры и функций системы контроля и оценки точности космического сегмента ГНСС для определения оцениваемых параметров эфемеридно-временной информации и навигационного поля .....	8
1.1 Космический сегмент ГНСС и система контроля его точностных характеристик .....	8
1.2 Структура и функции системы контроля и оценки точности космического сегмента ГНСС .....	10
1.3 Оцениваемые параметры эфемеридно-временной информации и навигационного поля.....	12
2 Обоснование методики оценки точности ЭВИ и навигационного поля ГНСС.....	16
2.1 Постановка задачи и необходимость разработки .....	16
2.2 Структура методики и состав исходных данных.....	17
2.3 Расчет показателей точности ЭВИ .....	20
2.4 Расчет показателей точности навигационного поля.....	25
2.5 Выходные показатели и их назначение.....	32
2.5.1 Показатели точности ЭВИ космического сегмента.....	32
2.5.2 Показатели точности навигационного поля.....	33
3 Формирование исходных данных и описание формата их хранения.....	34
4 Разработка программного обеспечения для оценки точности ЭВИ и навигационного поля ГНСС .....	37
4.1 Характеристика и средства программной реализации .....	37

4.2 Структура программного комплекса и основные модули .....	38
4.3 Программная реализация расчётовых модулей.....	40
5 Результаты оценки точности ЭВИ и навигационного поля ГНСС.....	46
5.1 Условия вычислительных экспериментов .....	46
5.2 Результаты оценки точности эфемеридно-временной информации .....	47
5.3 Результаты оценки навигационного поля и их анализ .....	51
5.4 Выводы по разделу.....	55
6 Экономическая часть .....	57
6.1 Оценка научно-технической прогрессивности .....	57
6.2. Оценка целесообразности разработки программного продукта.....	61
6.3 Планирование процесса выполнения разработки.....	63
6.4 Построение и расчёт сетевого графа .....	67
6.5 Определение затрат, себестоимости и цены проводимой НИР .....	73
6.6 Определение и оценка показателей экономической эффективности ....	76
7 Охрана труда и окружающей среды.....	79
7.1 Характеристика производственного помещения .....	79
7.2 Характеристика производственного оборудования.....	80
7.3 Характеристика производственных процессов .....	82
7.4 Оценка условий труда инженера .....	84
7.4.1 Оценка тяжести трудового процесса .....	84
7.4.2 Оценка напряженности трудового процесса.....	85
7.4.3 Микроклимат рабочего помещения.....	87
7.4.4 Уровень шума на рабочем месте .....	90

7.4.5 Оценка факторов условий труда и реализуемые мероприятия по их улучшению.....	91
7.5   Оценка по эргономике рабочего места.....	94
7.6   Классификация помещения по электро и пожароопасности.....	97
7.6.1 Электроопасность помещения .....	97
7.6.2 Пожароопасность помещения.....	99
7.6.3 Оценка электроопасности рабочего помещения.....	100
7.6.4 Оценка пожароопасности рабочего помещения .....	101
7.7   Расчёт и оценка освещения рабочего места инженера .....	102
7.7.1 Расчет естественного освещения графо-аналитическим методом	103
7.7.2 Расчет искусственного освещения рабочего помещении.....	107
7.7.3 Совмешённое освещение .....	111
8   Технологическая часть .....	114
8.1 Анализ исходных данных.....	114
8.2 Разработка конструкции изделия .....	117
8.2.1 Анализ элементной базы .....	117
8.2.2 Разработка конструкции функциональной ячейки .....	121
8.2.2.1 Выбор материала печатной платы .....	121
8.3 Анализ конструкции изделия .....	128
8.3.1 Выбор системы охлаждения.....	128
8.3.2 Расчет перекрестных помех электрических коротких линий связи .....	130
8.4 Разработка технологии сборки .....	133
8.4.1 Расчет конструкторских показателей технологичности .....	133

8.4.2 Расчет производительных показателей технологичности.....	135
8.4.3 Комплексная оценка технологичности .....	137
8.4.4 Разработка технологической схемы сборки .....	138
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>140</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>142</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Модуль расчёта ошибок ЭВИ.....</b>	<b>146</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Функции расчета показателей SISRE/SISVE .....</b>	<b>148</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Модуль вычисления показателей точности навигационного поля .....</b>	<b>150</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Сборочный чертеж ФЯ .....</b>	<b>153</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Спецификация.....</b>	<b>154</b>

## **ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ**

ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система России.

ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система

НКА – навигационный космический аппарат.

НП – навигационное поле

ОГ – орбитальная группировка

ПО – программное обеспечение.

ЭВИ – эфемеридно-временная информация.

ЧВП – частотно-временные параметры.

BRDC – агрегированный RINEX-файл вещательных эфемерид.

GPS – Global Positioning System, глобальная навигационная спутниковая система США.

IGS – International GNSS Service, международная служба ГНСС.

RMS – Root Mean Square, среднеквадратическое значение.

SISRE – Signal-in-Space Range Error, ошибка сигнала в пространстве по дальности.

SISVE – Signal-in-Space Velocity Error, ошибка сигнала в пространстве по псевдоскорости.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) являются одними из основных элементов навигационного обеспечения. Результаты работы многих технических систем напрямую зависят от точности навигационных сообщений, формируемых космическим сегментом. Поэтому требуются надёжные средства контроля характеристик эфемеридно-временной информации (ЭВИ) и навигационного поля.

Оценка качества навигационного обеспечения не ограничивается номинальными характеристиками системы. Используют количественные показатели фактической точности предоставляемых навигационных данных и координатно-временных решений при анализе работы космического сегмента, и планировании применения ГНСС.

Получение этих показателей опирается на математический аппарат обработки наблюдений навигационных космических аппаратов. Практическое применение такого подхода требует реализации соответствующих алгоритмов и программных средств для автоматизированного расчёта и наглядного представления результатов.

Целью дипломной работы является разработка и программная реализация инструментария для оценки точности эфемеридно-временной информации и навигационного поля ГНСС на основе методики расчёта показателей точности [1]. Объектом исследования является космический сегмент глобальной навигационной спутниковой системы, а предметом – показатели точности ЭВИ и навигационного поля и алгоритмы их оценки по результатам анализа навигационных данных.

В работе реализуются изложенные в методике расчётные модели и алгоритмы в виде совокупности вычислительных процедур, образующих единый программно-алгоритмический комплекс оценки точности. Дополнительно анализируются структура и функции системы контроля

космического сегмента ГНСС, формируются требования к исходным данным и форматам их хранения, разрабатывается программное обеспечение и выполняются расчёты с последующим анализом результатов.

Актуальность работы связана с ростом требований к точности и устойчивости координатно-временного обеспечения и с расширением областей применения высокоточных технологий позиционирования. В этих условиях наличие ПО, реализующего формализованную методику оценки точности ЭВИ и навигационного поля космического сегмента ГНСС, позволяет повысить эффективность мониторинга навигационного обеспечения.

# **1 Анализ структуры и функций системы контроля и оценки точности космического сегмента ГНСС для определения оцениваемых параметров эфемеридно-временной информации и навигационного поля**

## **1.1 Космический сегмент ГНСС и система контроля его точностных характеристик**

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) относятся к классу систем координатно-временного обеспечения предназначенных для всепогодного высокоточного определения координат приемника в геоцентрической системе координат, смещения показаний его часов относительно показаний часов навигационной системы и составляющих вектора скорости приемника. В отличие от локальных и региональных радионавигационных средств, ГНСС обеспечивают общедоступность и глобальность использования благодаря тому, что в их основе лежит беззапросный метод измерений, что позволяет использовать сигналы этих систем неограниченному числу потребителей. Это позволяет использовать их как основу для решения задач управления движением различных объектов в околоземном пространстве и синхронизации разнесенных в нем событий.

Согласно [2] в общем случае любая глобальная навигационная спутниковая система (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou и др.) состоит из трех основных подсистем:

- Подсистема космических аппаратов (Космический сегмент).
- Подсистема управления (Наземный сегмент).
- Подсистема потребителей (Пользовательский сегмент).

Космический сегмент представляет собой орбитальную группировку навигационных космических аппаратов, излучающих радиосигналы с навигационным сообщением. Он включает действующие и резервные спутники, обеспечивающие требуемое пространственно-временное покрытие

и избыточность. Основные функции космического сегмента – формирование и передача навигационных сигналов и поддержание высокой стабильности бортовых шкал времени.

Наземный сегмент (контроля и управления) включает сеть опорных станций наблюдения, центры управления и станции закладки навигационной информации. Он обеспечивает мониторинг орбитального движения и технического состояния космических аппаратов, определение уточнённых параметров их орбит и бортовых часов, формирование эфемеридно-временной информации и передачу обновлённых данных на спутники.

Пользовательский сегмент образуется совокупностью навигационной аппаратуры потребителя – приёмников ГНСС и связанного с ними программного обеспечения. Приёмники принимают и обрабатывают навигационные сигналы, извлекают из навигационного сообщения эфемеридно-временные параметры и по измеренным псевдодальностям и псевдофазам вычисляют координаты, скорость и время пользователя.

С точки зрения координатно-временного обеспечения именно через космический сегмент передается потребителю эфемеридно-временная информация (ЭВИ) и обеспечивается навигационное поле системы в пространстве и времени. Под навигационным полем понимают совокупность навигационных характеристик системы (видимость спутников, геометрия созвездия, точность координатно-временных определений) в каждой точке обслуживаемой области и в каждый момент времени.

Пользователи, опираясь на приёмники ГНСС, не могут оперативно и с требуемой точностью оценивать вклад космического сегмента в суммарную погрешность, так как не располагают эталонной орбитально-временной информацией и разнесённой сетью опорных станций. Поэтому в составе наземного сегмента выделяется специализированный контур контроля точности космического сегмента.

## 1.2 Структура и функции системы контроля и оценки точности космического сегмента ГНСС

Для независимого количественного контроля ошибок космического сегмента ГНСС создаётся специализированная система контроля и оценки точности космического сегмента (ошибок ЭВИ), организационно связанная с Центром управления системой и Центром контроля и подтверждения характеристик ГНСС.

В более обобщённом виде систему контроля можно представить как совокупность нескольких взаимосвязанных подсистем: сети опорных станций, средств связи, центров обработки, баз данных и подсистемы представления результатов [2]

Структурная схема взаимодействия этих подсистем и основных потоков данных приведена на рис. 1.1

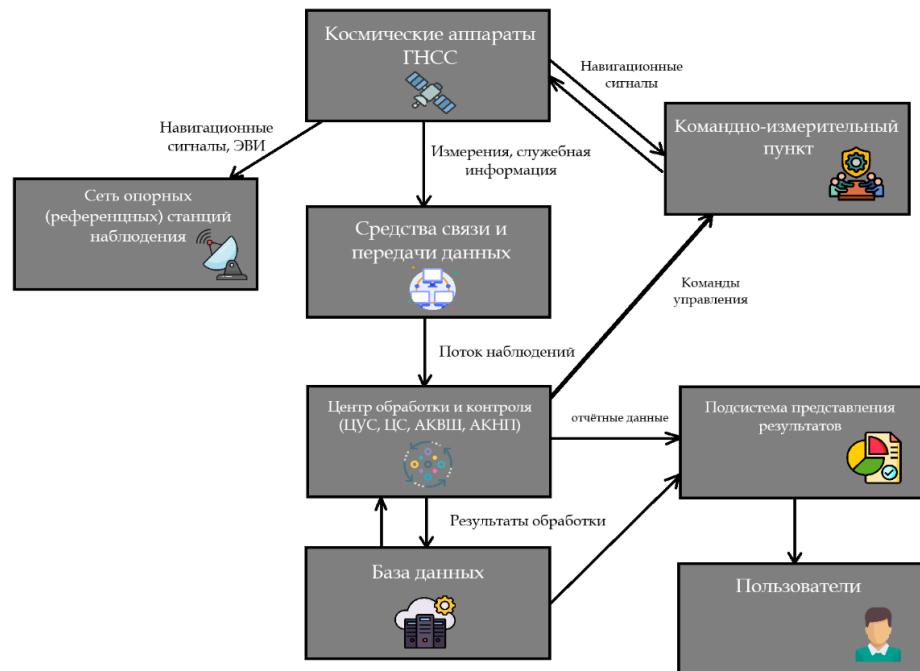


Рисунок 1.1 – Обобщённая структурная схема системы контроля и оценки точности космического сегмента ГНСС

Опорные станции (командно-измерительные пункты) обеспечивают непрерывный приём навигационных сигналов и формирование исходных наблюдений (измерений параметров движения КА), средства связи выполняют сбор и передачу измерительной информации и служебных данных в центры обработки. В центрах обработки реализуются алгоритмы высокоточного определения и прогнозирования орбит и частотно-временных параметров космических аппаратов, расчёта показателей качества ЭВИ и навигационного поля, а также формируются отчётные материалы. Базы данных используются для долговременного хранения измерений, расчётных эфемеридно-временных параметров и временных рядов оценок точности, обеспечивая возможность последующего анализа и сравнения различных периодов функционирования системы. Подсистема представления результатов обеспечивает доступ к этим данным эксплуатационному персоналу и внешним пользователям в виде таблиц, графиков, карт навигационного поля и сводных отчётов.

Функционально система контроля решает комплекс задач по формированию эталонных (опорных) эфемеридно-временных данных и их сопоставлению с информацией, содержащейся в штатных навигационных сообщениях. На основе измерений, поступающих с командно-измерительных пунктов, в центре управления определяются параметры математических моделей движения спутников и полиномиальные модели смещения показаний их часов относительно показаний часов ГНСС, выполняется прогноз этих параметров на заданный интервал и формируются данные, предназначенные для закладки в навигационные сообщения [2]. Параллельно вычисляются показатели, характеризующие качество ЭВИ и навигационного поля, что позволяет осуществлять непрерывный мониторинг соответствия космического сегмента установленным требованиям.

### **1.3 Оцениваемые параметры эфемеридно-временной информации и навигационного поля**

Как следует из рассмотренных структуры и функций системы контроля, её основным результатом являются уточнённые (эталонные) оценки орбит и частотно-временных параметров навигационных космических аппаратов, а также рассчитанные на их основе показатели качества навигационного обслуживания в заданных районах пространства. Сеть опорных станций и центры обработки обеспечивают независимое определение положения спутников, параметров бортовых часов и характеристик навигационного поля во времени. Далее полученные величины сопоставляются с данными, содержащимися в навигационных сообщениях. В совокупности этих операций формируется набор параметров эфемеридно-временной информации и навигационного поля, подлежащих количественной оценке.

С одной стороны, контролируются собственно параметры ЭВИ на уровне отдельного космического аппарата. К этим параметрам относятся погрешности эфемерид спутника в выбранной системе координат, погрешности частотно-временных поправок (ЧВП) (ошибки бортовой шкалы времени и относительной нестабильности частоты), а также агрегированные показатели ошибок сигнала в пространстве. С другой стороны, по результатам контроля орбит и времени и с учётом текущей конфигурации созвездия формируются параметры навигационного поля, характеризующие навигационные возможности системы для пользователя. Здесь рассматривается количество видимых КА и их взаимное расположение над объектом, геометрические показатели качества (DOP-характеристики) и интегральные оценки точности навигационного обеспечения (ошибки определения координат, скорости и времени потребителя).

В качестве эталонных значений для параметров ЭВИ принимают уточнённые орбиты и ЧВП, которые определяют по измерениям опорной сети.

Оцениваемыми в этом случае являются отклонения ЭВИ, передаваемой в навигационных сообщениях, от указанных эталонных значений [2]. Чтобы такая оценка была корректной, точность эталонной ЭВИ должна превосходить точность проверяемой как минимум в три раза [1].

К основным параметрам ЭВИ, подлежащим контролю, относят несколько групп ошибок.

Первая группа – ошибки координат спутника в выбранной системе координат. Они показывают расхождение между эталонным положением НКА и положением, вычисленным по штатным эфемеридам навигационного сообщения. На практике такие ошибки разлагают по орбитальным осям: радиальной, вдоль орбиты и боковой (поперечной). Это позволяет отдельно проанализировать доминирующие составляющие орбитальной погрешности.

Вторая группа – ошибки скоростей спутника. Они задают отклонения компонент вектора скорости от эталонных значений и особенно важны при оценке параметров псевдоскорости, используемых при расчёте показателя Signal in Space Velocity Error (SISVE), который показывает эквивалентную ошибку псевдоскорости за счет космического сегмента.

Отдельно рассматривают ошибки бортового времени, то есть погрешности частотно-временных поправок. В этом случае оценивают смещение шкалы времени спутника относительно шкалы времени ГНСС. Ошибки бортового времени вычисляют как разность между эталонной и штатной поправками.

Кроме того, контролируют интегральные показатели качества ЭВИ, такие как Signal in Space Range Error (SISRE), который показывает, какую погрешность в измерении псевдодальности вносит совокупное действие ошибок орбиты и бортовых часов спутника.

Следующая группа – ошибки относительного отклонения частоты излучаемого сигнала (частотные погрешности ЧВП). Контроль этих

параметров, представленных в виде относительного отклонения частоты от номинала, позволяет оценить устойчивость бортового генератора и используется для расчёта SISRE и SISVE.

Параметры навигационного поля описывают, что реально может дать система условному пользователю в конкретной точке пространства и в конкретный момент времени. Поскольку система контроля, опираясь на уточнённые орбиты и частотно-временные параметры НКА, может смоделировать конфигурацию созвездия и качество ЭВИ в любой точке обслуживаемой области, логично формировать набор показателей навигационного поля так, чтобы он был напрямую связан с практическими задачами пользователя.

К основным оцениваемым параметрам навигационного поля относятся:

- Характеристики видимости спутников. Сюда относят число одновременно наблюдаемых КА над заданной точкой при выбранной маске высоты, интервалы непрерывной видимости, распределение КА по азимутам и высотам. Эти показатели определяют сам факт работоспособности навигации в данной точке и уровень избыточности измерений.
- Геометрические показатели качества (DOP-характеристики): совокупность безразмерных коэффициентов (GDOP, PDOP, HDOP, VDOP, TDOP), характеризующих геометрическую обусловленность ошибок навигационного решения. Они связывают среднеквадратическую погрешность измерений псевдодальности (и времени) с погрешностями определения координат и времени и тем самым позволяют оценивать, насколько «выгодна» в геометрическом смысле конфигурация созвездия над пользователем.

- Интегральные оценки точности для потребителя. Рассматривают расчётные значения среднеквадратических погрешностей определения координат по осям, в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также погрешности скорости и времени. Дополнительно используют радиальные и горизонтальные показатели точности, например радиус двумерной или трёхмерной ошибки с заданной вероятностью. Эти величины получают с учётом геометрии созвездия через DOP факторы и качества ЭВИ, то есть ошибок орбит и часов, поэтому они фактически отражают тот уровень точности, который реально обеспечивается пользователю в данном навигационном поле.
- Показатели доступности и устойчивости навигационного обслуживания. Здесь оценивают долю времени, в течение которой в рассматриваемой точке выполняются заданные требования к числу наблюдаемых КА, параметрам DOP и точности решения. Дополнительно рассматривают вероятность непрерывного предоставления услуги без незапланированных прерываний за заданный интервал. При необходимости вводят показатели целостности, которые характеризуют своевременность обнаружения аномалий. Такие параметры позволяют оценивать не только мгновенное состояние навигационного поля, но и его надёжность во времени.

## **2 Обоснование методики оценки точности ЭВИ и навигационного поля ГНСС**

### **2.1 Постановка задачи и необходимость разработки**

В соответствии с методикой [1] погрешность эфемеридно-временной информации (ЭВИ) космического сегмента рассматривается как вклад ошибок эфемерид и частотно-временных параметров (ЧВП) навигационных космических аппаратов в ошибки псевдодальности SISRE и псевдоскорости SISVE. Количественную оценку этого вклада получают при сравнении штатной ЭВИ, передаваемой в навигационных сообщениях, с эталонной ЭВИ, точность которой заведомо выше не менее чем в три раза. Погрешность навигационного поля в этом подходе понимают как погрешность навигационных определений потребителя, усреднённую в зоне действия системы и обусловленную только погрешностями эфемерид и ЧВП.

На этой основе формулируется задача методики: для заданной орбитальной группировки ГЛОНАСС/GPS и заданного интервала времени  $[T_n, T_k]$  по результатам сравнения эталонной и штатной ЭВИ определить временные и интегральные показатели точности ЭВИ (ошибки координат и частотно-временных параметров НКА, показатели SISRE и SISVE). Дополнительно вычисляют показатели точности навигационного поля, которые характеризуют ошибки навигационных определений пользователя в рассматриваемой области обслуживания.

Необходимость разработки и применения рассматриваемой методики напрямую связана с требованиями технического задания на составную часть ОКР «Доверие-МАИ». В рамках этого проекта институт выполняет работы по созданию программного обеспечения ТЭВИНП для оценки точности эфемеридно-временной информации и навигационного поля систем ГЛОНАСС и GPS, как раздельно, так и при их совместном использовании. В соответствии с ТЗ программное обеспечение должно формировать текущие,

предварительные и окончательные оценки функциональных характеристик в апостериорном режиме на заданных интервалах времени. Методики расчёта этих характеристик согласуют с методиками оценки индикаторов и показателей ФЦП. Реализуемая в дипломной работе методика оценки точности ЭВИ и навигационного поля рассматривается как основа для программной реализации подсистемы ТЭВИНП на первом этапе ОКР «Доверие-МАИ»

## **2.2 Структура методики и состав исходных данных**

Структурно методика [1] представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов обработки данных.

На первом этапе (подготовка данных) исходные сведения об орбитальной группировке, эталонных параметрах движения и времени НКА, а также эфемеридно-временные параметры из навигационных сообщений приводятся к единой системе координат и времени и синхронизируются на заданной временной сетке  $[T_h, T_k], \Delta T$ ; при этом штатные координаты, рассчитанные по ИКД в системе ПЗ-90.02 (для ГЛОНАСС) или WGS-84 (для GPS), переводятся в систему ITRF с использованием параметров перехода так, чтобы соответствовать системе, в которой заданы эталонные эфемериды.

На втором этапе (формирование ошибок ЭВИ) для каждого спутника вычисляются разности между эталонными и штатными орбитальными и частотно-временными параметрами, а также формируются индексы доступности оценки точности эфемерид и ЧВП на основе заданных порогов (например, 1000 м для координат и 1000 нс для временных параметров), что обеспечивает корректное взвешивание и отбор данных при последующем усреднении.

На третьем этапе на основании полученных ошибок орбиты и времени рассчитываются показатели качества сигнала в пространстве SISRE и SISVE для отдельных НКА и орбитальной группировки в целом с учётом

коэффициентов, определённых по результатам моделирования наблюдений НКА при углах места более  $5^\circ$  (в частности, порядка 0,19 для ГЛОНАСС и 0,141 для GPS); при этом формируются текущие, суточные и годовые значения этих показателей.

На заключительном этапе (оценка навигационного поля) на основе ошибок сигнала в пространстве и геометрии созвездия выполняется решение навигационной задачи для условного пользователя с контролем целостности (RAIM), при условии, что геометрический фактор PDOP не превышает заданного порога (например, 6) и учитываются только НКА, видимые на углах места более  $5^\circ$  и пригодные к использованию; расчёт проводится на сетке точек с постоянным шагом по долготе и переменным шагом по широте, пропорциональным  $\cos B_J$ , что обеспечивает равенство площадей элементарных ячеек при дальнейшем осреднении показателей точности навигационного поля.

Состав исходных данных, используемых в соответствии с методикой [1] для оценки точности ЭВИ и навигационного поля, приведён в табл. 2.1.

Таблица 2.1 - Состав исходных данных

Наименование исходных данных	Краткое содержание	Использование в методике
Состав орбитальной группировки (ОГ)	Перечень НКА ГЛОНАСС и GPS, входящих в рассматриваемую ОГ, с числом спутников $N_{\text{КА}}$	Определение множества НКА, по которым выполняется оценка точности ЭВИ и навигационного поля
Эталонные координаты и скорости НКА	Эталонные $(X^{\mathfrak{B}}, Y^{\mathfrak{B}}, Z^{\mathfrak{B}} \text{ и } V_X^{\mathfrak{B}}, V_Y^{\mathfrak{B}}, V_Z^{\mathfrak{B}})$ НКА ГЛОНАСС и GPS в заданной системе координат	Формирование эталонных эфемерид для вычисления ошибок координат и скоростей по разностям «эталон – штатные»

## Продолжение таблицы 2.1

Эталонные параметры бортовых часов	Эталонные поправки бортовых часов $T^3$ и эталонные относительные отклонения частоты излучаемого сигнала $\gamma^3$	Вычисление ошибок бортового времени и погрешностей относительной нестабильности частоты, входящих в SISRE/SISVE
Штатные эфемериды и ЧВП НКА	Эфемериды и частотно-временные параметры НКА, переданные в составе оперативной информации, либо координаты и ЧВП	Формирование «проверяемой» ЭВИ космического сегмента для сравнения с эталонной ЭВИ
Альманах системы с признаками пригодности	Для ГЛОНАСС – параметр $C_n$ ; для GPS – параметр SV Health-A	Отбор пригодных к использованию НКА по данным альманаха при расчёте показателей точности
Оперативная информация с признаками пригодности	Для ГЛОНАСС – параметры $B_n$ и $l_n$ ; для GPS – параметры SB Health-S	Дополнительный контроль пригодности НКА по оперативной информации; исключение «нездоровых» спутников из расчётов
Интервал оценки точности	Начальный и конечный моменты времени $T_n$ , $T_K$ для оценки точности ЭВИ и навигационного поля	Задание временного диапазона, в пределах которого формируются временные ряды ошибок и интегральные показатели
Шаг по времени оценки точности	Шаг $\Delta T$ расчёта показателей точности ЭВИ (и навигационного поля)	Определение дискретной сетки по времени (эпох расчёта), по которой вычисляются текущие ошибки и проводится усреднение
Параметры пространственной сетки	Шаг по широте $B_J$ и по долготе $L_K$ , где J и K – индексы массивов координат по широте и долготе	Формирование сетки расчётных точек для оценки ошибок навигационного поля по поверхности Земли или в заданном регионе

## 2.3 Расчет показателей точности ЭВИ

В настоящем подразделе приводятся обозначения и расчётные соотношения, используемые в методике [1]

На текущую эпоху  $I$ , которой соответствует момент времени  $T_I$ , для каждого  $M$ -го НКА определяется разность между эталонными и штатными координатами  $D^{IM}$  и скоростями  $DV^{IM}$  НКА.

$$D^{IM} = \begin{pmatrix} dX^{IM} \\ dY^{IM} \\ dZ^{IM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{\exists}^{IM} - X_{\text{шт}}^{IM} \\ Y_{\exists}^{IM} - Y_{\text{шт}}^{IM} \\ Z_{\exists}^{IM} - Z_{\text{шт}}^{IM} \end{pmatrix},$$

$$DV^{IM} = \begin{pmatrix} dVX^{IM} \\ dVY^{IM} \\ dVZ^{IM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} VX_{\exists}^{IM} - VX_{\text{шт}}^{IM} \\ VY_{\exists}^{IM} - VY_{\text{шт}}^{IM} \\ VZ_{\exists}^{IM} - VZ_{\text{шт}}^{IM} \end{pmatrix},$$

где

$X_{\exists}^{IM}, Y_{\exists}^{IM}, Z_{\exists}^{IM}$  - эталонные координаты  $M$ -го НКА на эпоху  $I$ ;

$VX_{\exists}^{IM}, VY_{\exists}^{IM}, VZ_{\exists}^{IM}$  - эталонные скорости  $M$ -го НКА на эпоху  $I$ ;

$X_{\text{шт}}^{IM}, Y_{\text{шт}}^{IM}, Z_{\text{шт}}^{IM}$  - координаты и скорости, рассчитанные по ИКД и приведённые к системе ITRF с учётом перехода из ПЗ-90.02 [5] (WGS-84 [6] для GPS).

Далее рассчитывается модуль вектора разности между текущими эталонными и штатными координатами  $M$ -го НКА на эпоху  $I$ :

$$|D^{IM}| = \sqrt{(dX^{IM})^2 + (dY^{IM})^2 + (dZ^{IM})^2}.$$

аналогично модуль погрешности скорости:

$$DV^{IM} = \sqrt{(dV_X^{IM})^2 + (dV_Y^{IM})^2 + ((dV_Z^{IM})^2)}$$

Переход к орбитальной системе координат:

Оценка ошибок эфемерид выполняется в орбитальной системе координат с осями: радиальное направление  $E_r^{IM}$ , направление вдоль орбиты и  $E_n^{IM}$  боковое направление  $E_b^{IM}$ . Единичный вектор в радиальном направлении задаётся компонентами

$$E_r^{IM} = \begin{pmatrix} E_{rX}^{IM} \\ E_{rY}^{IM} \\ E_{rZ}^{IM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_\vartheta^{IM} / \sqrt{(X_\vartheta^{IM})^2 + (Y_\vartheta^{IM})^2 + (Z_\vartheta^{IM})^2} \\ Y_\vartheta^{IM} / \sqrt{(X_\vartheta^{IM})^2 + (Y_\vartheta^{IM})^2 + (Z_\vartheta^{IM})^2} \\ Z_\vartheta^{IM} / \sqrt{(X_\vartheta^{IM})^2 + (Y_\vartheta^{IM})^2 + (Z_\vartheta^{IM})^2} \end{pmatrix}$$

Единичный вектор в боковом направлении орбиты определяется по эталонной скорости НКА:

$$E_b^{IM} = \frac{E_b^{IM*}}{|E_b^{IM*}|} = \begin{pmatrix} E_{bX}^{IM} \\ E_{bY}^{IM} \\ E_{bZ}^{IM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{bX}^{IM*} / \sqrt{(E_{bX}^{IM*})^2 + (E_{bY}^{IM*})^2 + (E_{bZ}^{IM*})^2} \\ E_{bY}^{IM*} / \sqrt{(E_{bX}^{IM*})^2 + (E_{bY}^{IM*})^2 + (E_{bZ}^{IM*})^2} \\ E_{bZ}^{IM*} / \sqrt{(E_{bX}^{IM*})^2 + (E_{bY}^{IM*})^2 + (E_{bZ}^{IM*})^2} \end{pmatrix}$$

Единичный вектор в направление вдоль орбиты получаем как векторное произведение

$$E_n^{IM} = [E_b^{IM} \cdot E_r^{IM}]$$

Погрешности скорости  $M$ -го НКА на эпоху  $I$  в направлениях по радиусу, вдоль орбиты и боковом направлении рассчитываются по формулам:

$$dVR^{IM} = (DV^{IM} \cdot E_r^{IM}) = dVX^{IM} \cdot E_{rX}^{IM} + dVY^{IM} \cdot E_{rY}^{IM} + dVZ^{IM} \cdot E_{rZ}^{IM};$$

$$dVN^{IM} = (DV^{IM} \cdot E_n^{IM}) = dVX^{IM} \cdot E_{nX}^{IM} + dVY^{IM} \cdot E_{nY}^{IM} + dVZ^{IM} \cdot E_{nZ}^{IM};$$

$$dVB^{IM} = (DV^{IM} \cdot E_b^{IM}) = dVX^{IM} \cdot E_{bX}^{IM} + dVY^{IM} \cdot E_{bY}^{IM} + dVZ^{IM} \cdot E_{bZ}^{IM}.$$

Аналогично для погрешностей скорости на эпоху III рассчитываются проекции: радиальная

$$dV_R^{IM} = DV^{IM} \cdot E_r^{IM}$$

$$dV_N^{IM} = DV^{IM} \cdot E_n^{IM}$$

$$dV_B^{IM} = DV^{IM} \cdot E_b^{IM}$$

Погрешность шкалы времени (смещение показаний часов) М-го НКА на эпоху I определяется как разность между эталонной и штатной поправками бортовых часов:

$$dT^{IM} = T_{\exists}^{IM} - T_{\text{ШТ}}^{IM}$$

Погрешность относительной нестабильности частоты излучаемого радиосигнала на той же эпохе определяется аналогично:

$$d\gamma^{IM} = \gamma_{\exists}^{IM} - \gamma_{\text{ШТ}}^{IM}$$

где:

$\gamma_{\exists}^{IM}$  - эталонные относительные отклонения номинала частоты М-го НКА ГЛОНАСС на эпоху I;

$\gamma_{\text{ШТ}}^{IM}$  - штатные относительные отклонения номинала частоты  $\gamma_n(\text{tb})$  М-го НКА ГЛОНАСС, полученные из навигационного кадра сообщений эфемерид.

Погрешность относительной нестабильности частоты излучаемого радиосигнала M-го НКА GPS на эпоху I, определяется по формуле:

$$daf_1^{IM} = af_{1\exists}^{IM} - af_{1\text{ШТ}}^{IM},$$

где:

$af_{1\exists}^{IM}$  - эталонные относительные отклонения номинала частоты М-го НКА GPS на эпоху I;

$af_{1\text{ШТ}}^{IM}$  - штатные относительные отклонения номинала частоты  $\gamma_n(\text{tb})$  М-го НКА GPS, полученные из навигационного кадра сообщений эфемерид.

Текущая погрешность псевдодальности за счёт космического сегмента М-го НКА GPS на эпоху I в методике определяется через ошибки орбиты и времени по формуле:

$$SISRE^{IM} = \sqrt{(0.98dR^{IM} - c \cdot dT_M^{IM})^2 + 0.19^2(dN^{IM2} + dB^{IM2})}$$

Для GPS коэффициент при ошибке в плоскости местного горизонта равен 0,141, для ГЛОНАСС - 0,19; здесь использовано значение 0,19, приведённое для ГЛОНАСС, и множитель с — скорость света). Коэффициент 0,19 получен на основе математического моделирования наблюдения НКА ГЛОНАСС произвольным потребителем при углах места более 5°

Текущая погрешность псевдоскорости за счёт космического сегмента М-го НКА на эпоху I определяется как

$$SISVE^{IM} = \sqrt{(DV^{IM})^2 + (DR^{IM})^2 + (DD^{IM})^2},$$

где

$$(DV^{IM})^2 = (0.98dVR^{IM} - c \cdot d\gamma^{IM})^2 + 0.19^2(dVN^{IM2} + dVB^{IM2})$$

$$(DR^{IM})^2 = \left( \frac{|V|}{D} \cdot dN^{IM} \right)^2,$$

$$(DD^{IM})^2 = \left( \frac{\dot{D}}{D} \right)^2 \cdot (0.98dR^{IM2} + 0.19^2 \cdot (dN^{IM2} + dB^{IM2}))$$

где D и  $\dot{D}$  - текущая дальность до НКА и её производная по времени, определяемые по эталонной орбите.

Именно величины SISRE и SISVE, рассчитанные по указанным соотношениям на каждой эпохе и для каждого НКА, далее используются в методике для формирования суточных и годовых интегральных оценок

качества космического сегмента и для перехода к показателям точности навигационного поля.

Предварительное значение погрешности псевдодальности за счет ошибки космического сегмента по всем НКА на J-ом суточном интервале рассчитывается по формуле:

$$SISRE^J = \sqrt{\frac{\sum_{M=1}^{N_{KA}} \sum_{I=1}^{N_T^J} (SISRE^{IM})^2 \cdot \delta_p^{IM} \cdot \delta_T^{IM}}{\sum_{M=1}^{N_{KA}} \sum_{I=1}^{N_T^J} \delta_p^{IM} \cdot \delta_T^{IM}}}.$$

Предварительное значение погрешности псевдоскорости за счет ошибки космического сегмента по всем НКА на J-ом суточном интервале рассчитывается по формуле:

$$SISVE^J = \sqrt{\frac{\sum_{M=1}^{N_{KA}} \sum_{I=1}^{N_T^J} (SISVE^{IM})^2 \cdot \delta_p^{IM} \cdot \delta_T^{IM}}{\sum_{M=1}^{N_{KA}} \sum_{I=1}^{N_T^J} \delta_p^{IM} \cdot \delta_T^{IM}}}.$$

Для контроля выполняется расчёт 95-го процентиля по текущим значениям. На каждом суточном интервале:

Сначала формируется массив всех  $SISRE_{IM}$  (или  $SISVE_{IM}$ ) за сутки по всем НКА, и сортируются по возрастанию.

После берется элемент с номером

$$N_{95} = |(N_{TS} - 1) \cdot 0,95|$$

где  $N_{TS}$  – число валидных точек за сутки.

Это и есть суточный порог  $SISRE_{95,J}$ ,  $SISVE_{95,J}$

Для интервала из нескольких суток берётся максимум по соответствующим  $SISRE_{95,J}$ ,  $SISVE_{95,J}$ .

## 2.4 Расчет показателей точности навигационного поля

В методике [1] точность навигационного поля понимается как точность координатно-временных и скоростных определений потребителя, обусловленная только погрешностями эфемерид и частотно-временных параметров, передаваемых в навигационных сообщениях. Оценка выполняется решением навигационной задачи в узлах сетки  $B_J, L_K$  при дискретизации по времени  $T_I$  ( $\Delta T \leq 10$  мин,  $\Delta L = const$ , шаг по широте выбирается пропорционально  $\cos B_J$  для равенства площадей ячеек). В расчёт включаются лишь пригодные НКА, наблюдаемые при углах места более  $5^\circ$  и обеспечивающие  $PDOP \leq 6$  [1]. Ошибки эфемерид и частотно-временных параметров, определённые в подразделе 2.3, преобразуются в приращения псевдодальностей и псевдоскоростей для узла  $(B_J, L_K)$ , на основе которых по линейной модели и методу наименьших квадратов находится вектор ошибок координатно-временного решения в локальной геодезической системе.

На каждую эпоху  $T_I$  для каждого  $M$ -го НКА формируются векторы разностей между эталонными и штатными координатами и скоростями,

$$D^{IM} = \begin{pmatrix} dX^{IM} \\ dY^{IM} \\ dZ^{IM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{\exists}^{IM} - X_{\text{шт}}^{IM} \\ Y_{\exists}^{IM} - Y_{\text{шт}}^{IM} \\ Z_{\exists}^{IM} - Z_{\text{шт}}^{IM} \end{pmatrix},$$

$$DV^{IM} = \begin{pmatrix} dVX^{IM} \\ dVY^{IM} \\ dVZ^{IM} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} VX_{\exists}^{IM} - VX_{\text{шт}}^{IM} \\ VY_{\exists}^{IM} - VY_{\text{шт}}^{IM} \\ VZ_{\exists}^{IM} - VZ_{\text{шт}}^{IM} \end{pmatrix},$$

Эти векторы описывают ошибки орбитального движения НКА и далее используются при вычислении ошибок псевдодальности и псевдоскорости в точках сетки навигационного поля.

Разности «эталон–штатные» координат  $D^{IM}$  и скоростей  $DV^{IM}$  используются для формирования ошибок псевдодальностей и псевдоскоростей в расчётных точках навигационного поля. Для узла сетки с широтой  $B_J$  и долготой  $L_K$  координаты условного потребителя на поверхности Земли радиуса  $R_Z$  задаются как

$$\begin{bmatrix} X_{\Pi} \\ Y_{\Pi} \\ Z_{\Pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_Z \cdot \cos B_J \cdot \cos L_K \\ R_Z \cdot \cos B_J \cdot \sin L_K \\ R_Z \cdot \sin B_J \end{bmatrix}$$

Направление от точки  $(X_P, Y_P, Z_P)$  на  $M$ -й НКА описывается единичным вектором

$$W_{JK}^{IM} = \begin{pmatrix} (X_{KA} - X_{\Pi}) / \sqrt{(X_{KA} - X_{\Pi})^2 + (Y_{KA} - Y_{\Pi})^2 + (Z_{KA} - Z_{\Pi})^2} \\ (Y_{KA} - Y_{\Pi}) / \sqrt{(X_{KA} - X_{\Pi})^2 + (Y_{KA} - Y_{\Pi})^2 + (Z_{KA} - Z_{\Pi})^2} \\ (Z_{KA} - Z_{\Pi}) / \sqrt{(X_{KA} - X_{\Pi})^2 + (Y_{KA} - Y_{\Pi})^2 + (Z_{KA} - Z_{\Pi})^2} \end{pmatrix},$$

где:

$X_{KA}, Y_{KA}, Z_{KA}$ , - апостериорные или штатные координаты НКА ГЛОНАСС,  
 $X_{\Pi}, Y_{\Pi}, Z_{\Pi}$ , - координаты потребителя, получаемые с помощью формулы  
(средний радиус Земли  $R_Z$  составляет 6371 км):

Результирующая ошибка псевдодальности  $M$ -го НКА для точки  $(B_J, L_K)$  на эпоху  $T_I$  определяется по методике [1] как

$$PD_{JK}^{IM} = (D^{IM} \cdot H_{JK}^{IM}) + dTM^{IM}$$

Где ошибка часов НКА:

$$dT M^{IM} = T_{\exists}^{IM} - T_{\text{ШТ}}^{IM} - dTS^I$$

выделяется с исключением влияния расхождения системных шкал времени. Величина  $dTS^I$  – наблюдаемое мгновенное расхождение системных шкал эталонных и штатных данных – рассчитывается по всем НКА, для которых доступны и эталонные, и штатные поправки:

$$dTS^I = \frac{\sum_M^{N_{KA}} dT^{IM} \cdot \delta_T^{IM}}{\sum_M^{N_{KA}} \delta_T^{IM}}$$

Где  $dT_M^{IM}$  равен  $dT^{IM} = T_{\exists}^{IM} - T_{\text{ШТ}}^{IM}$ , а индекс доступности оценки ЧВП М-го НКА на эпоху I:

$$\delta_T^{IM} = \begin{cases} 1, & \text{если } dT^{IM} \leq 1000\text{нс} \\ 0, & \text{если } dT^{IM} > 1000\text{нс, либо недоступны штатные или эталонные данные} \end{cases}$$

Аналогично результирующая ошибка псевдоскорости для той же точки и эпохи задаётся как

$$PVD_{JK}^{IM} = (VD^{IM} \cdot W_{JK}^{IM}) + d\gamma^{IM},$$

где  $d\gamma^{IM} = \gamma_{\exists}^{IM} - \gamma_{\text{ШТ}}^{IM}$  – ошибка относительного отклонения частоты  $M$ -ого НКА.

Для узла сетки с координатами  $(B_J, L_K)$  и эпохи  $T_I$  в локальной геодезической системе координат (N – север, E – запад, U – вверх) вектор ошибок координатно-временного решения определяется методом наименьших квадратов по ошибкам псевдодальностей  $PD_{JK}^{IM}$ :

$$\Delta q_{JK}^I = \left( \sum_{i=1}^{M_B} W_{Gi} W_{Gi}^T \right)^{-1} \sum_{i=1}^{M_B} W_{Gi} \cdot PD_{JK}^{li}$$

здесь:

$M_B$  - число видимых на углах места более 5 градусов пригодных к использованию НКА, вектор ошибок решения потребительской задачи:  $\Delta N_{JK}^I$  - в направлении на север,  $\Delta E_{JK}^I$  - на запад,  $\Delta U_{JK}^I$  - по высоте,  $\Delta T_{JK}^I$  - по времени;

$$W_{Gi} = \begin{bmatrix} E_{Ni} \\ E_{Ei} \\ E_{Ui} \\ 1 \end{bmatrix}$$

вектор производных от измерений псевдодальности по положению в местной геодезической системе координат и времени, рассчитываемый для каждого наблюдаемого НКА.

Первые три компоненты вектора  $W_{Gi}$  получаются в результате перевода производных от дальности до НКА по координатам потребителя в условной Земной системе координат в местную геодезическую систему координат, оси которой направлены на север, запад и по нормали к поверхности земного эллипсоида:

$$\begin{bmatrix} E_{Ni} \\ E_{Ei} \\ E_{Ui} \end{bmatrix} = M_{JK}^T \cdot W_{JK}^{IM}.$$

$M_{JK}$  - матрица перехода из условной земной системы координат в местную систему координат:

$$M_{JK} = \begin{bmatrix} -\sin B_J \cdot \cos L_K & -\sin B_J \cdot \sin L_K & \cos B_J \\ -\sin L_K & \cos L_K & 0 \\ \cos B_J \cdot \cos L_K & \cos B_J \cdot \sin L_K & \sin B_J \end{bmatrix}.$$

Определение скорости потребителя выполняется по формуле:

$$\Delta Vq_{JK}^I = \left( \sum_{i=1}^{M_B} W_{Gi} W_{Gi}^T \right)^{-1} \sum_{i=1}^{M_B} W_{Gi} \cdot PVD_{JK}^{li}.$$

Формируется индекс доступности решения потребительской задачи  $\delta_{JK}^I$ .

$$\delta_{JK}^I = \begin{cases} 1, & \text{при условии получения решения потребительской задачи} \\ 0, & \text{при невозможности решения потребительской задачи} \end{cases}$$

Текущая ошибка уточнения координат потребителя на эпоху  $I$  для точки с координатами  $B_J$ ,  $L_K$  рассчитывается по следующим формулам:

a) для пространственных координат:

$$\Delta P_{JK}^I = \sqrt{(\Delta N_{JK}^I)^2 + (\Delta E_{JK}^I)^2 + (\Delta U_{JK}^I)^2};$$

б) для горизонтальных координат:

$$\Delta H_{JK}^I = \sqrt{(\Delta N_{JK}^I)^2 + (\Delta E_{JK}^I)^2}.$$

На заданном временном интервале для узла  $(B_J, L_K)$  предварительные (суточные) оценки ошибок навигационного поля задаются как среднеквадратические значения по всем эпохам, в которые решение доступно ( $\delta_{JK}^I = 1$ ):

a) при определении пространственных координат потребителя:

$$P_{JK} = \sqrt{\frac{\sum_I^{N_T} \delta_{JK}^I \cdot (\Delta P_{JK}^I)^2}{\sum_I^{N_T} \delta_{JK}^I}};$$

б) при определении координат потребителя в плоскости местного горизонта:

$$H_{JK} = \sqrt{\frac{\sum_{I=1}^{N_T} \delta_{JK}^I \cdot (\Delta H_{JK}^I)^2}{\sum_{I=1}^{N_T} \delta_{JK}^I}};$$

в) при определении координат потребителя по высоте:

$$U_{JK} = \sqrt{\frac{\sum_{I=1}^{N_T} \delta_{JK}^I \cdot (\Delta U_{JK}^I)^2}{\sum_{I=1}^{N_T} \delta_{JK}^I}};$$

г) при определении времени потребителя:

$$T_{JK} = \sqrt{\frac{\sum_{I=1}^{N_T} \delta_{JK}^I \cdot (\Delta T_{JK}^I)^2}{\sum_{I=1}^{N_T} \delta_{JK}^I}}.$$

Окончательная погрешность навигационного поля по всей рассматриваемой поверхности при определении пространственных координат рассчитывается по формуле:

$$P = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^{N_L} \sum_{J=1}^{N_B} \sum_{I=1}^{N_T} \delta_{JK}^I \cdot (\Delta P_{JK}^I)^2 \cdot \cos B_J}{\sum_{K=1}^{N_L} \sum_{J=1}^{N_B} \sum_{I=1}^{N_T} \delta_{JK}^I \cdot \cos B_J}}.$$

аналогично:

$$H = \sqrt{\frac{\sum_{K}^{{N_L}} \sum_{J}^{{N_B}} \sum_{I}^{{N_T}} \delta_{JK}^I \cdot (\Delta H_{JK}^I)^2 \cdot \cos B_J}{\sum_{K}^{{N_L}} \sum_{J}^{{N_B}} \sum_{I}^{{N_T}} \delta_{JK}^I \cdot \cos B_J}},$$

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{K}^{{N_L}} \sum_{J}^{{N_B}} \sum_{I}^{{N_T}} \delta_{JK}^I \cdot (\Delta U_{JK}^I)^2 \cdot \cos B_J}{\sum_{K}^{{N_L}} \sum_{J}^{{N_B}} \sum_{I}^{{N_T}} \delta_{JK}^I \cdot \cos B_J}},$$

$$V = \sqrt{\frac{\sum_{K}^{{N_L}} \sum_{J}^{{N_B}} \sum_{I}^{{N_T}} \delta_{JK}^I \cdot (\Delta V_{JK}^I)^2 \cdot \cos B_J}{\sum_{K}^{{N_L}} \sum_{J}^{{N_B}} \sum_{I}^{{N_T}} \delta_{JK}^I \cdot \cos B_J}},$$

$$T = \sqrt{\frac{\sum_{K}^{{N_L}} \sum_{J}^{{N_B}} \sum_{I}^{{N_T}} \delta_{JK}^I \cdot (\Delta T_{JK}^I)^2 \cdot \cos B_J}{\sum_{K}^{{N_L}} \sum_{J}^{{N_B}} \sum_{I}^{{N_T}} \delta_{JK}^I \cdot \cos B_J}}.$$

Поскольку для каждого контролируемого параметра формирование ранжированного ряда производится по всем точкам на поверхности Земли одновременно, допускается, что локальные 95% погрешности могут оказаться хуже рассчитанных величин.

Для каждого суточного интервала определяется значение погрешности определения координат потребителей за счет «космического сегмента»  $\Delta P_{95}^L$ ,  $L=1, N_s$ , которое не превышается в 95% случаев. Оно соответствует элементу ранжированного ряда  $\{\Delta P^I\}$  с номером  $NDP95 = (N_{ts}^J - 1) \cdot 0.95$ .

Значение погрешности определения в реальном времени в абсолютном режиме положения потребителей за счет «космического сегмента» на

произвольном суточном интервале, не превышаемое с вероятностью 0.95, определяется как:

$$\Delta P_{95} = \text{Max}(\Delta P_{95}^L), \quad L = 1, N_S$$

## 2.5 Выходные показатели и их назначение

В результате расчётов по методике [1] формируется совокупность выходных показателей, условно разделяемых на две взаимосвязанные группы: показатели точности эфемеридно-временной информации (ЭВИ) космического сегмента и показатели точности навигационного поля.

### 2.5.1 Показатели точности ЭВИ космического сегмента

К основным компонентным показателям относятся:

- погрешности координат М-го НКА в орбитальной системе координат (радиальная  $dR^{IM}$ , вдольорбитальная  $dN^{IM}$  и поперечная  $dB^{IM}$  составляющие) и соответствующие погрешности компонент скорости  $dV_R^{IM}$ ,  $dV_N^{IM}$ ,  $dV_B^{IM}$  по которым формируются текущие, суточные и интегральные среднеквадратические оценки для каждого НКА и орбитальной группировки в целом;
- погрешности бортового времени и частотно-временных параметров: разности между эталонными и штатными поправками часов  $dT^{IM}$  и ошибки относительного отклонения частоты излучаемого сигнала  $d\gamma^{IM}$ , сопровождаемые их статистическими характеристиками.

Интегральными показателями качества сигнала в пространстве являются SISRE и SISVE. Для них формируются временные ряды текущих значений, суточные и интегральные оценки по НКА и группировке в целом, а также 95-процентные пороги, характеризующие уровни ошибок псевдодальности и псевдоскорости, не превышаемые в 95 % случаев.

## 2.5.2 Показатели точности навигационного поля

Показатели навигационного поля описывают точность навигационного решения условного потребителя в расчётных точках по поверхности Земли, обусловленную погрешностями ЭВИ и частотно-временных параметров космического сегмента.

Для каждого узла пространственной сетки  $B_J, L_K$  и эпохи  $T_I$  формируются текущие ошибки: пространственных координат  $\Delta P_{JK}^I$ , координат в плоскости местного горизонта  $\Delta H_{JK}^I$ , высоты  $\Delta U_{JK}^I$ , модуля вектора скорости  $\Delta V_{JK}^I$ , времени  $\Delta T_{JK}^I$ , а также индекс доступности решения навигационной задачи  $\delta_{JK}^I$ .

На основе текущих ошибок для каждого узла  $B_J, L_K$  рассчитываются суточные среднеквадратические показатели точности: пространственных координат  $P_{JK}$ , горизонтальной составляющей  $H_{JK}$ , высоты  $U_{JK}$ , скорости  $V_{JK}$  и времени  $T_{JK}$ . Эти величины используются при построении карт навигационного поля и анализе качества навигационного обслуживания в отдельных районах.

Интегральные показатели точности навигационного поля по всей рассматриваемой области  $P, H, U, V, T$  получаются осреднением суточных ошибок по всем узлам сетки и эпохам с весовым коэффициентом  $\cos B_J$ , обеспечивающим равенство площадей, приходящихся на узлы сетки. По ранжированным рядам текущих ошибок дополнительно определяются 95-процентные пороги, представляющие значения соответствующих показателей, не превышаемые с вероятностью 0,95 на любом суточном интервале.

### **3 Формирование исходных данных и описание формата их хранения**

В работе используются суточные орбитально-временные продукты типа IGS/IGS-like [4], формируемые на основе глобальной сети ГНСС-станций и распространяемые через центры данных (например, CDDIS) в виде стандартных файлов формата RINEX [3] и SP3. Для каждого анализируемого интервала берутся три типа файлов.

- Комбинированный навигационный файл BRDC (RINEX Navigation). Используется суточный агрегированный файл вида BRDC00IGS\_R\_YYYYDDD0000\_01D\_MN.rnx, содержащий вещательные эфемериды (broadcast ephemeris) сразу по нескольким созвездиям (GPS, ГЛОНАСС и др.). Такие файлы формируются IGS путём объединения навигационных файлов отдельных станций и публикуются как стандартный продукт комбинированных эфемерид. Внутри RINEX-навигации хранятся параметры орбит и поправок часов, транслируемые в навигационных сообщениях. Из BRDC-файла в программе восстанавливаются «штатные» координаты и скорости спутников, а также поправки часов.
- Файл точных орбит SP3 (precise orbit). Используется суточный файл вида igsWWWWd.sp3, содержащий координаты (и, при необходимости, скорости) спутников в глобальной системе координат (IGS/ITRF) на равномерной временной сетке. Формат SP3 является стандартом для распространения точных эфемерид IGS и других аналитических центров. Типичный шаг по времени составляет 900 с (15 мин). Эти данные рассматриваются как эталонные орбиты, относительно которых оцениваются ошибки вещательных эфемерид.
- Файл точных часов CLK (RINEX Clock). Используется суточный файл вида igsWWWWd.clk, содержащий высокоточные поправки спутниковых часов в формате RINEX Clock (строки типа AS для НКА).

Значения в таких файлах задают смещение часов спутников относительно опорной шкалы времени с шагом порядка 300 с и являются частью официальных комбинированных продуктов IGS по часам [4]. В программе эти данные используются как эталонные поправки часов.

На этапе предварительной обработки все данные из файлов BRDC, SP3 и CLK приводятся к единому внутреннему формату, пример которого изображен на рис. 3.1.

The screenshot shows a comparison between two stages of data processing:

**Do парсинга (Raw Format):**

```
RINEX VERSION / TYPE 3.03          N: GNSS NAV DATA
PGM / RUN BY / DATE COD           2020-01-15 00:00:00 UTC
LEAP SECONDS          18
END OF HEADER
G01 2020 01 15 00 00 00 0.123E-03 ...
G03 2020 01 15 00 00 00 0.542E-03 ...
G05 2020 01 15 00 00 00 0.311E-03 ...
...
# Особенности: разный шаг (5-30 с), экспоненциальный формат,
# отдельные CLK лежат в .CLK.gz, возможны пропуски эпох
```

**После парсинга (Normalized Format):**

```
epoch,sv,prn,clk,clk_drift,x,y,z
2020-01-15T00:00:00Z,G,01,0.000123,-26543.1,13423.7,21456.2
2020-01-15T00:00:00Z,G,03,0.000542,-19743.8,18432.5,17854.3
2020-01-15T00:00:00Z,G,05,0.000311,-21450.2,16743.0,20110.6
...
# clk_aligned.parquet: те же поля, колоночный формат
# Нормализация: единый шаг, УТК/ГПС приведены, дырки заполнены NaN
```

Рисунок 3.1 – Пример преобразования навигационных данных BRDC из формата RINEX в нормализованный табличный формат

Координаты и скорости эталонных и штатных эфемерид пересчитываются в единую земную систему координат (ECEF/ITRF) и интерполируются на общую временную сетку с шагом 300 с, шкалы времени (GPST, UTC и др.) согласуются в выбранной опорной шкале, поправки часов и относительное отклонение частоты пересчитываются к единому представлению. В результате формируются согласованные массивы орбитально-временных параметров для каждого НКА и каждой эпохи, которые далее используются при расчёте ошибок ЭВИ, показателей SISRE/SISVE и параметров навигационного поля.

Нормализованные данные складываются в колоночные таблицы Parquet: каждому полю — свой столбец (epoch, sv, x\_ref, y\_ref, z\_ref, x\_brdc, y\_brdc, z\_brdc, clk\_ref, clk\_brdc, freq\_brdc, mask\_orbit, mask\_clock и др.). Такой формат минимизирует объём на диске, ускоряет выборку узких срезов (например, только орбит или только поправок часов) и позволяет подавать данные в вычислительные модули без дополнительных преобразований структур. На основе таблиц сразу собираются рабочие массивы, с которыми дальше работает код: разности орбитальных и временных параметров  $\Delta r(t, M)$ ,  $\Delta v(t, M)$ ,  $\delta T(t, M)$ , частотные поправки  $c \cdot \delta f(t, M)$ , ошибки в орбитальной системе координат R–N–B, а также индексы доступности оценок. Для расчёта показателей навигационного поля параллельно формируются трёхмерные массивы, индексируемые по узлам пространственной сетки и времени. В них хранятся ошибки координат, скорости и времени пользователя, вместе с масками доступности по каждому узлу и моменту.

Такая организация обеспечивает единообразную адресацию каждого элемента, снимает двусмысленности при сопоставлении этапов методики и конкретных структур в программе, а также упрощает кэширование: орбиты/часы/маски можно подгружать независимо и переиспользовать между расчётами разных метрик.

## **4 Разработка программного обеспечения для оценки точности ЭВИ и навигационного поля ГНСС**

### **4.1 Характеристика и средства программной реализации**

Разрабатываемое программное обеспечение выполняет полный цикл обработки навигационных данных. В процессе работы оно загружает исходные данные, приводит их к единой системе координат и времени, вычисляет ошибки эфемерид и частотно-временных параметров, рассчитывает показатели SISRE и SISVE по отдельным спутникам и по орбитальной группировке, формирует показатели точности навигационного поля доступность, PDOP, 95% пространственные ошибки на заданной сетке регионов и выгружает результаты в табличном виде. Расчётная часть написана на языке программирования Python [7] в виде консольного приложения. Для численных расчётов и векторной обработки данных используется библиотека NumPy [8], стандартные модули argparse, json, os, math и другие обеспечивают интерфейс командной строки, работу с файлами и базовые математические операции, а обмен результатами с модулями визуализации и внешними средствами анализа результатами организован через формируемые CSV-файлы.

Для анализа и наглядного представления результатов применяется веб-интерфейс на JavaScript [9]. Он загружает рассчитанные CSV-файлы, отображает их в виде интерактивных карт и графиков. Библиотека D3.js используется для построения тепловых карт навигационного поля по региональной сетке и временных рядов показателей SISRE и SISVE. Стандартные Web API браузера fetch, SVG и Canvas [10] обеспечивают загрузку данных и их визуализацию. Веб-часть носит вспомогательный характер, в расчётах не участвует, работает поверх уже полученных числовых показателей и даёт удобный инструмент для просмотра и анализа результатов работы программного комплекса.

## 4.2 Структура программного комплекса и основные модули

Программный комплекс построен по конвейерному принципу. Отдельные модули последовательно выполняют этапы обработки данных от чтения исходных файлов до формирования отчетных показателей. Общая структура комплекса и движение данных между основными модулями представлены на рисунке 4.1.

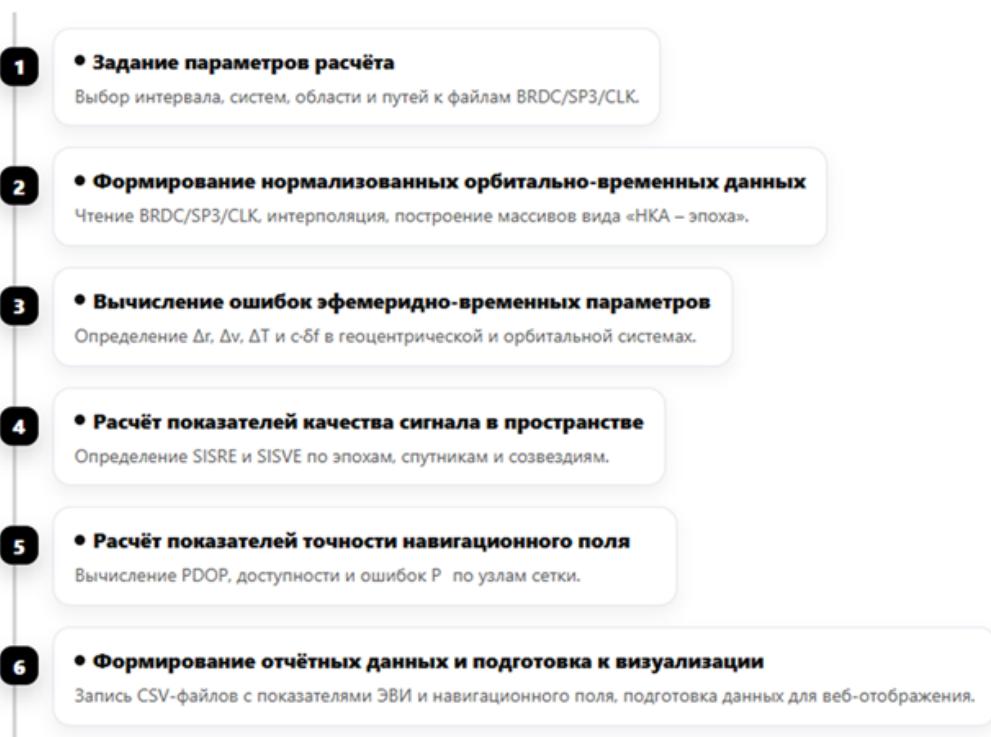


Рисунок 4.1 – Структура программного комплекса и последовательность обработки данных

На первом этапе пользователь задает параметры расчёта. Указываются анализируемые сутки, используемые системы, тип и область сетки навигационного поля, все это делается через конфигурационные файлы каталога config/ и параметры командной строки. Основной сценарий main.py на основании этих настроек формирует список суточных файлов BRDC, SP3 и CLK, которые нужно обработать, и передает эту информацию модулям ядра.

Далее модуль src/processing/eph\_build.py загружает суточные файлы BRDC RINEX-навигации, точные орбиты SP3 и опорные поправки часов CLK,

указанные в конфигурации main.py, интерполирует орбиты и часы на рабочую временную сетку и формирует для каждого НКА внутренние массивы вида «спутник–эпоха» с эталонными и вещественными координатами и временными параметрами. Затем модуль clock\_fit.py уточняет модель поведения спутниковых часов и подавляет выбросы. После этого модуль eph\_errors.py рассчитывает компонентные ошибки эфемерид и скоростей в геоцентрической и орбитальной системах координат. На основе полученных ошибок модули sisre.py и sisve.py вычисляют показатели SISRE и SISVE по эпохам и по отдельным спутникам, а модуль metrics.py агрегирует эти данные в суточные и интегральные показатели по каждому спутнику и по созвездию в целом и формирует отчетные таблицы по ЭВИ.

Для расчёта навигационного поля модуль src/navfield/navfield\_eval.py использует полученные ошибки ЭВИ и конфигурацию орбитальной группировки. По заданной пространственной сетке точек и для каждой эпохи отбираются пригодные к использованию спутники в соответствии с признаками «здоровья» и маской по углу места. По формулам методики [1], предоставленным в разделе 2.2, для каждой точки и эпохи вычисляются ошибки координатно-временного решения условного пользователя в локальной геодезической системе координат. Параметр PDOP, алгоритм расчета которого был представлен в первом разделе методики [1], который используется как технический критерий качества конфигурации (эпохи, в которых PDOP превышает заданный порог, из дальнейшего усреднения исключаются). Затем на основе оставшихся значений формируется интегральный показатель Р и его 95-процентная оценка. Полученные результаты записываются в виде CSV файлов в каталоги results/ и web/data/, где могут применяться для табличного анализа и для веб-визуализации на страницах index.html и navfield.html с использованием скриптов dashboard.js, navfield\_map.js и navfield\_page.js. В итоге структура

комплекса реализует сквозной цикл от задания конфигурации и загрузки файлов BRDC, SP3 и CLK до формирования эталонных и вещественных данных, расчёта ошибок ЭВИ и показателей SISRE и SISVE, вычисления параметров навигационного поля и сохранения отчетов и данных для отображения.

### **4.3 Программная реализация расчётных модулей**

Программная реализация математического аппарата оценки точности ЭВИ и навигационного поля выполнена в виде трёх взаимосвязанных модулей. Используется модуль формирования ошибок эфемеридно-временных параметров, модуль вычисления показателей SISRE и SISVE и модуль расчёта показателей навигационного поля. Ключевые фрагменты кода приведены в приложениях А, Б и В.

В модуле расчёта ошибок ЭВИ (приложение А) реализована функция `build_error_components`. Наглядная структура модуля расчёта ошибок ЭВИ представлена на рисунке 4.2.

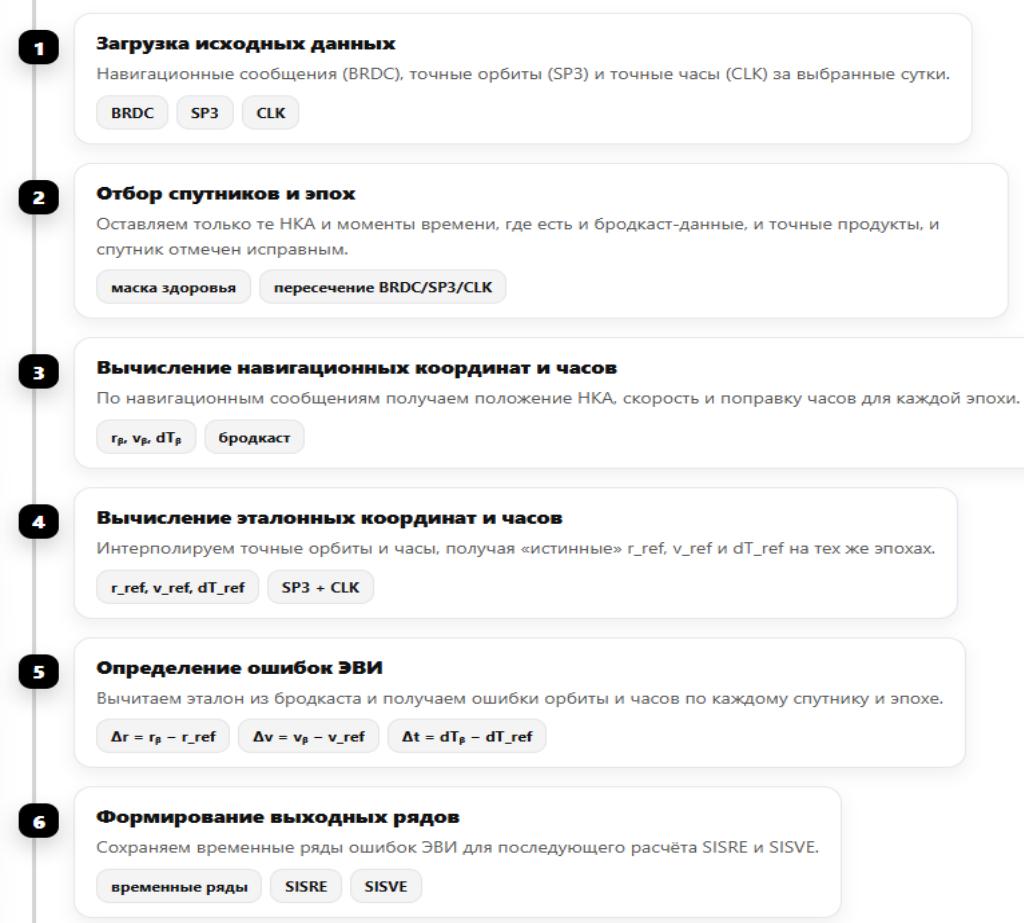


Рисунок 4.2 – Структура модуля расчёта ошибок ЭВИ

Она для каждого спутника и для каждой эпохи сравнивает эталонные координаты, скорости и параметры часов с соответствующими величинами, полученными из навигационных сообщений. Сначала формируются разности координат и скоростей спутника в земной прямоугольной системе координат ECEF:  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ,  $\Delta V_X$ ,  $\Delta V_Y$ ,  $\Delta V_Z$ . По векторам радиус-вектора и скорости НКА строится орбитальная система координат R–N–B, представленная на рисунке 4.3. И после в неё проецируются ошибки положения и скорости.

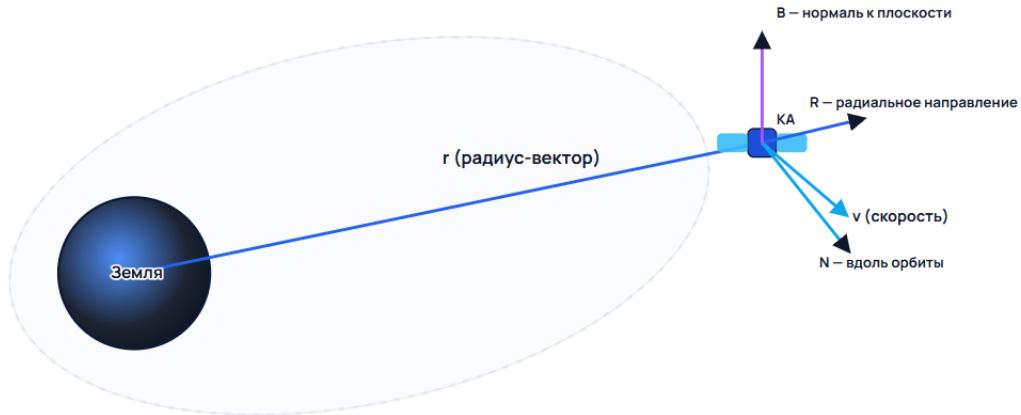


Рисунок 4.3 – Орбитальная система координат R–N–B

В результате получаются компоненты  $dR$ ,  $dN$ ,  $dB$ ,  $dVR$ ,  $dVN$ ,  $dVB$ , которые затем используют при расчёте SISRE и SISVE. Ошибка бортового времени определяется как разность эталонной и вещательной поправок часов  $dT$ . Если в файлах CLK или навигационных данных присутствует столбец относительного отклонения частоты (freq), он напрямую используется как  $d\gamma$ ; при его отсутствии относительное отклонение частоты оценивается численной производной по времени от  $dT$  с помощью функции `_derive_central`. В этом же модуле формируются маски пригодности по порогам ошибки координат, абсолютной величины временной ошибки, скачков поправок часов и относительной нестабильности частоты, что позволяет автоматически исключать из дальнейшей обработки заведомо некорректные измерения.

Модуль расчёта показателей SISRE и SISVE (приложение Б) содержит функции `sisre_satellite` и `sisve_satellite`. Структура модуля расчёта показателей SISRE и SISVE представлена на рисунке 4.4.

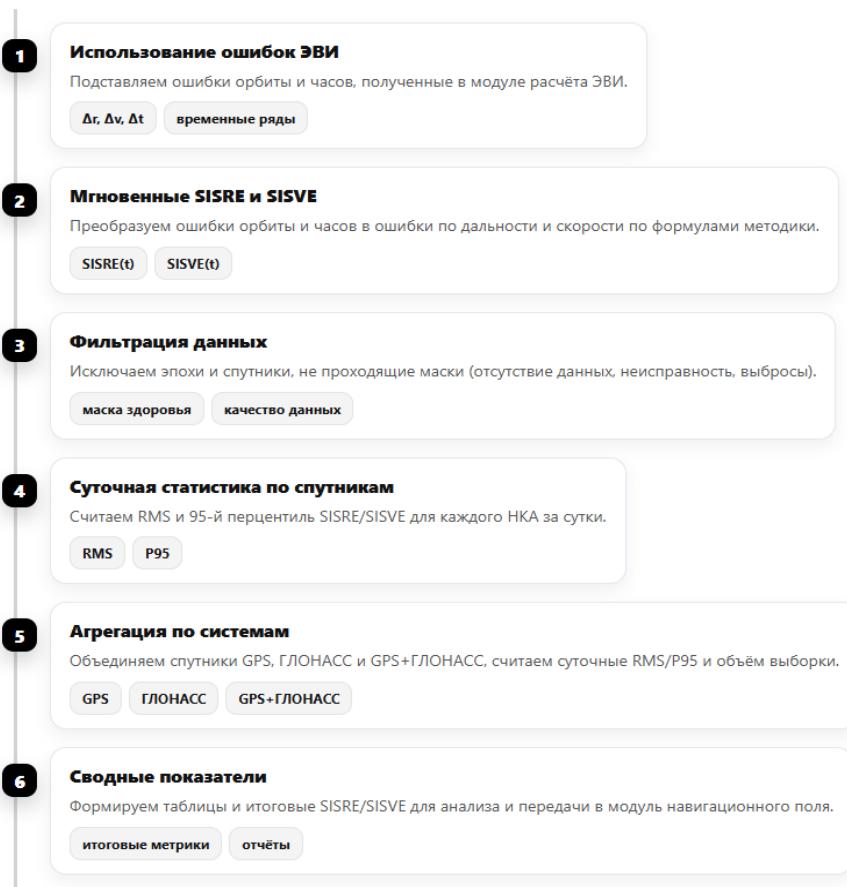


Рисунок 4.4 – Структура модуля расчёта показателей SISRE и SISVE

Эти функции выполняют свёртку компонент ошибок орбит и часов по формулам методики. В `sisre_satellite` учитываются радиальная составляющая ошибки положения, тангенциальные компоненты вдоль и поперёк орбиты, а также эквивалентная ошибка псевдодальности, связанная со смещением бортовых часов. Коэффициенты при компонентах выбираются в зависимости от навигационной системы GPS или ГЛОНАСС. Предусмотрен режим `debias`, в котором из временного ряда  $dT$  вычитается медианное смещение, в итоге получается вариант `debiased SISRE`. Функция `sisve_satellite` дополнительно использует ошибки скоростей, относительное отклонение частоты и калибровочные коэффициенты, описывающие среднюю дальность и относительную скорость НКА. На этой основе формируется показатель SISVE. В соответствии с методикой [1] для М-го НКА на эпоху I он вычисляется по формуле:

$$SISVE^{IM} = \sqrt{(DV^{IM})^2 + (DR^{IM})^2 + (DD^{IM})^2}$$

где  $DV^{IM}$  описывает вклад ошибок скоростей и частоты,  $DR^{IM}$  – вклад проекции орбитальных ошибок в скорость псевдодальности,  $DD^{IM}$  – составляющую, связанную с изменением расстояния до НКА.

На выходе обе функции возвращают временные ряды SISRE и SISVE с заполнением недопустимых эпох значением NaN по маскам пригодности и заданным диапазонам ошибок.

Расчёт показателей навигационного поля реализован в функции evaluate\_navfield (приложение В). Блок-схема модуля вычисления показателей точности навигационного поля изображена на рисунке 4.5.

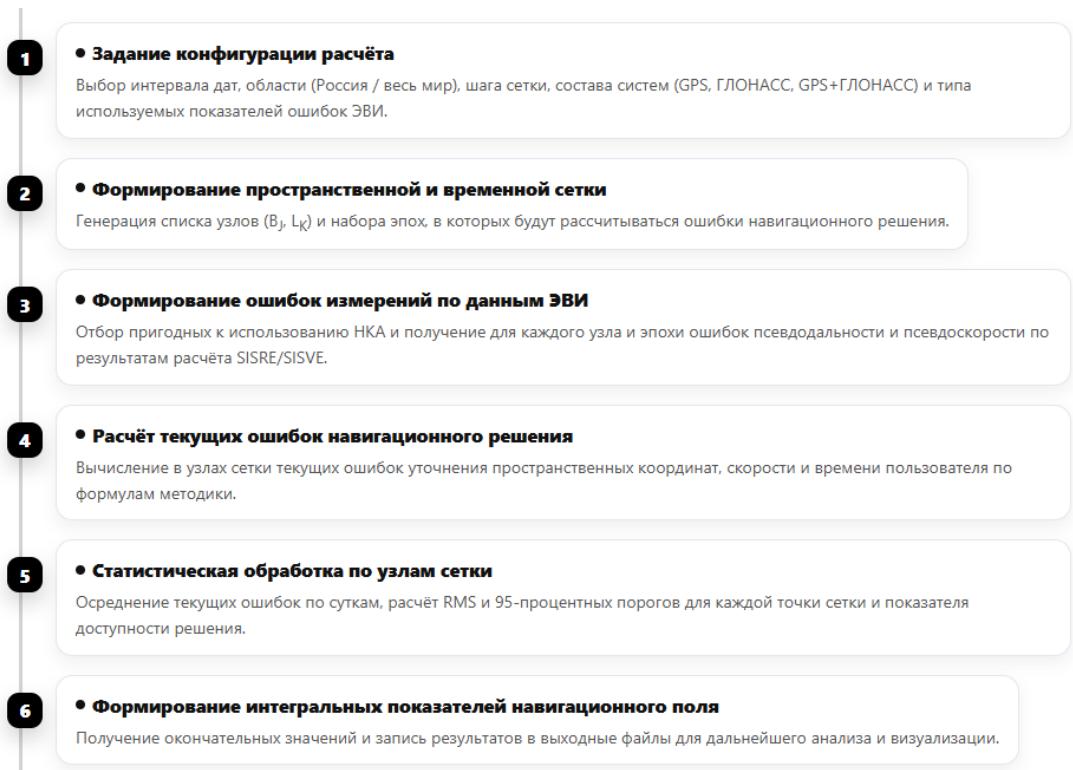


Рисунок 4.5 – Структура модуля вычисления показателей точности навигационного поля

На вход подаются конфигурация временного интервала, описание пространственной сетки и перечень используемых систем. По этим данным загружаются файлы BRDC, SP3 и CLK, создаётся провайдер, который для

каждой эпохи выдаёт положения спутников, а также ошибки координат и часов, согласованные с расчётом SISRE. Затем формируется сетка узлов по широте и долготе. Для каждого узла вычисляются координаты в системе ECEF и матрица перехода в локальную систему ENU.

Далее выполняется цикл по эпохам и узлам пространственной сетки. Для каждой эпохи из массивов ошибок ЭВИ выбираются НКА, пригодные к использованию по признакам «здоровья» и конфигурации созвездия. На основе рассчитанных в подразделе 2.2 ошибок псевдодальности и псевдоскорости для узла ( $B_J, L_K$ ) по формулам методики [1] последовательно получаются текущие ошибки уточнения координат, скорости и времени пользователя. Эти величины затем осредняются по времени в пределах суточного интервала, в результате чего формируются предварительные оценки  $P_{JK}$  для каждой точки сетки. На следующем шаге выполняется осреднение по всей рассматриваемой поверхности с весами  $\cos B_J$ , что реализует формулы методики для окончательного интегрального показателя точности навигационного поля Р и соответствующего 95-процентного порога.

Во всех модулях расчёты организованы с опорой на векторные операции библиотеки NumPy [8]: разности координат, преобразования и применение формул методики выполняются над массивами с осями «эпоха–спутник» и «эпоха–узел сетки». Циклы по времени и по точкам сетки используются только для последовательного применения этих формул к каждому узлу и эпохе. Для контроля корректности реализованы проверки на конечность значений, согласованность размеров массивов и выполнение пороговых условий; эпохи и узлы, в которых данные не удовлетворяют этим критериям, помечаются как недоступные и не участвуют в формировании итоговых показателей точности навигационного поля.

## **5 Результаты оценки точности ЭВИ и навигационного поля ГНСС**

### **5.1 Условия вычислительных экспериментов**

Для перехода от описания методики и программной реализации к анализу практических результатов необходимо зафиксировать условия проведённых вычислительных экспериментов. Анализ проводился на интервале с 15 по 21 октября 2025 года. Для каждого суток рассчитывались показатели качества ЭВИ, SISRE и SISVE, а также параметры навигационного поля отдельно для GPS, отдельно для ГЛОНАСС и для их совместной конфигурации GPS+ГЛОНАСС. Навигационное поле моделировалось в режиме учёта реальных ошибок сигнала в пространстве (SISRE-режим), то есть ошибки навигационного решения определялись только за счёт фактических ошибок ЭВИ.

Шаг по времени при формировании орбитально-временных данных и показателей SISRE и SISVE составлял 300 секунд. Навигационное поле вычислялось на регулярной сетке с шагом два на два градуса по широте и долготе. Рассматривались два варианта области расчёта: региональная область Россия режим RU и глобальная область режим WORLD. В качестве исходных данных для каждого суток использовались суточные файлы эфирных эфемерид BRDC00IGS\_R\_YYYYDOY0000\_01D\_MN.rnx, файлы точных орбит GFZ0MGXRAP\_YYYYMMDD0000\_01D\_05M\_ORB.SP3 и файлы точных часов GFZ0MGXRAP\_YYYYMMDD0000\_01D\_30S\_CLK.CLK [4].

Отбор НКА и измерений выполнялся по критериям пригодности, согласованным с методикой. В расчёт включались только исправные спутники, наблюдаемые на углах места не менее пяти градусов над горизонтом [1]. При решении навигационной задачи дополнительно применялся порог по геометрическому фактору PDOP не более шести. Для формирования ошибок ЭВИ задавались пороги по модулю ошибки координат, по абсолютной величине временной ошибки, по скачкам поправок часов и по

относительному отклонению частоты. Это позволяло исключать из расчётов аномальные значения.

## **5.2 Результаты оценки точности эфемеридно-временной информации**

В этом пункте приводятся результаты расчёта показателей SISRE и SISVE по методике [1] за интервал 15–21.10.2025, а также их сопоставление с данными внешнего информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО).

В качестве сводных показателей качества сигнала в пространстве используются среднеквадратические значения SISRE/SISVE (RMS) и соответствующие 95-процентные уровни. Под SISRE RMS понимается среднеквадратическое значение эквивалентной ошибки псевдодальности, усреднённое по всем спутникам и эпохам за рассматриваемый интервал. Аналогично SISVE RMS характеризует среднеквадратическую эквивалентную ошибку псевдоскорости. 95-процентный уровень (SISRE 95 %, SISVE 95 %) - это значение ошибки, которое не превышается в 95 % случаев, то есть предел, внутри которого лежит основная масса реализовавшихся погрешностей.

Суточные оценки SISRE/SISVE по системам GPS и ГЛОНАСС сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Суточные оценки SISRE и SISVE систем GPS и ГЛОНАСС.

Таблица значений

Дата	Система	SISRE RMS (м)	SISRE 95% (м)	SISVE RMS (м/с)	SISVE 95% (м/с)	Выборка
		Система (таблица)				
GPS + ГЛОНАСС						
2025-10-15	ГЛОНАСС	2.072	2.697	0.004046	0.005122	20
2025-10-15	GPS	1.013	1.628	0.002692	0.003521	31
2025-10-16	ГЛОНАСС	2.072	2.668	0.004053	0.005106	21
2025-10-16	GPS	1.001	1.628	0.002690	0.003521	30
2025-10-17	ГЛОНАСС	2.098	2.704	0.004048	0.005118	21
2025-10-17	GPS	0.999	1.633	0.002689	0.003509	30
2025-10-18	ГЛОНАСС	2.094	2.688	0.004060	0.005148	21
2025-10-18	GPS	1.017	1.650	0.002694	0.003513	31
2025-10-19	ГЛОНАСС	2.078	2.678	0.004056	0.005147	21
2025-10-19	GPS	1.021	1.621	0.002689	0.003506	31
2025-10-20	ГЛОНАСС	2.075	2.682	0.004064	0.005181	21
2025-10-20	GPS	1.033	1.641	0.002694	0.003521	31
2025-10-21	ГЛОНАСС	2.096	2.691	0.004079	0.005186	21
2025-10-21	GPS	1.046	1.655	0.002694	0.003526	31

Для GPS получено среднеквадратическое значение ошибки сигнала в пространстве по дальности  $SISRE RMS = 1.046$  м при 95-процентном уровне 1.655 м. Для ошибки псевдоскорости  $SISVE RMS$  составляет  $2.694 \cdot 10^{-3}$  м/с, а 95-процентное значение -  $3.526 \cdot 10^{-3}$  м/с. Для ГЛОНАСС соответствующие показатели существенно выше:  $SISRE RMS = 2.096$  м при 95-процентном уровне 2.691 м,  $SISVE RMS = 4.079 \cdot 10^{-3}$  м/с и  $SISVE 95 \% = 5.186 \cdot 10^{-3}$  м/с.

В столбце «Выборка» табл. 5.1 приведено число навигационных космических аппаратов соответствующей системы, для которых в данные сутки были доступны оценки SISRE/SISVE и которые участвовали в расчёте суточных значений RMS и 95-процентного уровня.

Таким образом, по результирующим оценкам вклад космического сегмента в ошибку псевдодальности у GPS примерно в два раза меньше, чем у ГЛОНАСС, а вклад в ошибку псевдоскорости - в 1.5–1.7 раза меньше. Относительный разброс суточных значений при этом остаётся умеренным: для GPS вариации  $SISRE RMS$  по дням не превышают  $\pm 0.02$ – $0.03$  м, для

ГЛОНАСС - порядка  $\pm 0.02$ – $0.03$  м вокруг значений  $\approx 2.1$  м, что указывает на устойчивый характер полученных оценок в пределах выбранного интервала наблюдений.

Итоговые оценки за весь анализируемый интервал представлены на рисунке 5.1.

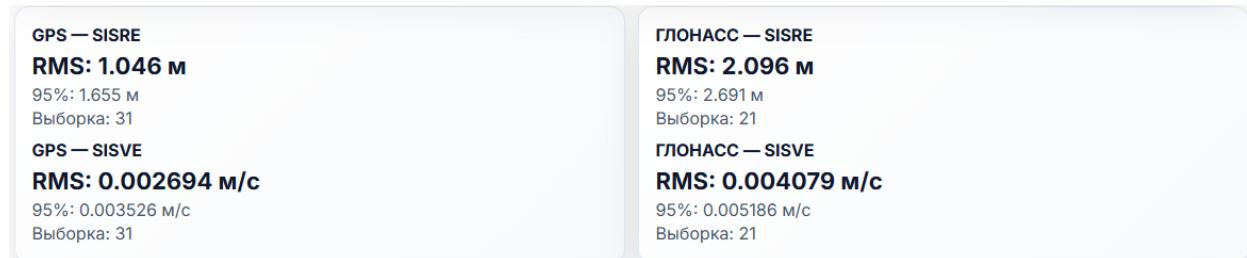


Рисунок 5.1 – Итоговые значения SISRE и SISVE для систем GPS и ГЛОНАСС за период 15–21.10.2025 г.

Для GPS получено SISRE RMS = 1.046 м при 95-процентном значении 1.655 м и SISVE RMS -  $2.694 \cdot 10^{-3}$  м/с при 95-процентном уровне  $3.526 \cdot 10^{-3}$  м/с. Для ГЛОНАСС соответствующие значения составляют SISRE RMS = 2.096 м, SISRE 95 % - 2.691 м, SISVE RMS =  $4.079 \cdot 10^{-3}$  м/с и SISVE 95 % =  $5.186 \cdot 10^{-3}$  м/с (рисунок 5.1). Таким образом, по результатам расчётов точность сигнала в пространстве космического сегмента GPS по дальности лучше примерно в два раза, а по скорости - в 1.5–1.7 раза по сравнению с ГЛОНАСС на рассматриваемом интервале.

Для валидации полученных оценок они были сопоставлены с открытыми материалами ИАЦ КВНО. На рисунках 5.2 и 5.3 приведены примеры суточных рядов мгновенных значений SISRE для GPS и ГЛОНАСС по данным ИАЦ.

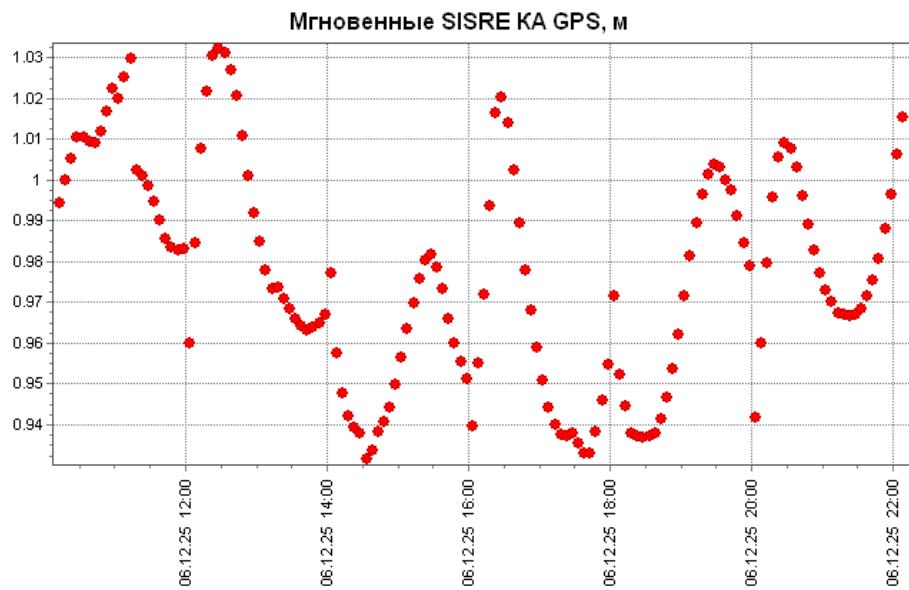


Рисунок 5.2 – Пример суточного ряда мгновенных значений SISRE KA GPS по данным ИАЦ КВНО.

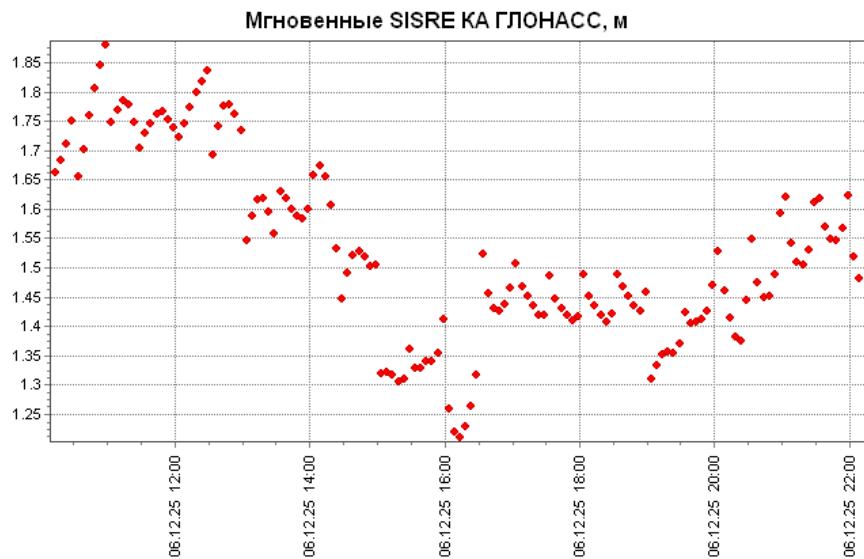


Рисунок 5.3 – Пример суточного ряда мгновенных значений SISRE KA ГЛОНАСС по данным ИАЦ КВНО.

Диапазон изменения SISRE для GPS находится около 0.95–1.03 м, что соответствует среднему уровню порядка 1 м, а для ГЛОНАСС — около 1.3–1.8 м. Эти значения хорошо согласуются с полученными в работе оценками: для GPS вычисленный SISRE RMS  $\approx 1.0$  м практически совпадает с оценкой

ИАЦ, для ГЛОНАСС полученный результат 2.1 м несколько выше, но лежит в ожидаемом диапазоне с учётом отличий интервалов времени, набора спутников и применяемых порогов фильтрации.

В целом проведённый анализ подтверждает корректность реализованной методики: полученные уровни SISRE/SISVE и соотношение между системами GPS и ГЛОНАСС согласуются с независимыми оценками, при этом разработанное программное обеспечение обеспечивает устойчивое воспроизведение временных и интегральных показателей качества ЭВИ на суточных интервалах.

### **5.3 Результаты оценки навигационного поля и их анализ**

Полученные в прошлом разделе показатели SISRE/SISVE были далее использованы для расчёта характеристик навигационного поля: 95-процентной трёхмерной ошибки позиционирования и доступности навигационного решения в узлах пространственной сетки. На рисунках 5.4–5.5 показаны полученные карты для отдельных конфигураций (GPS, ГЛОНАСС, GPS+ГЛОНАСС) в режиме учёта фактических ошибок ЭВИ («real»).

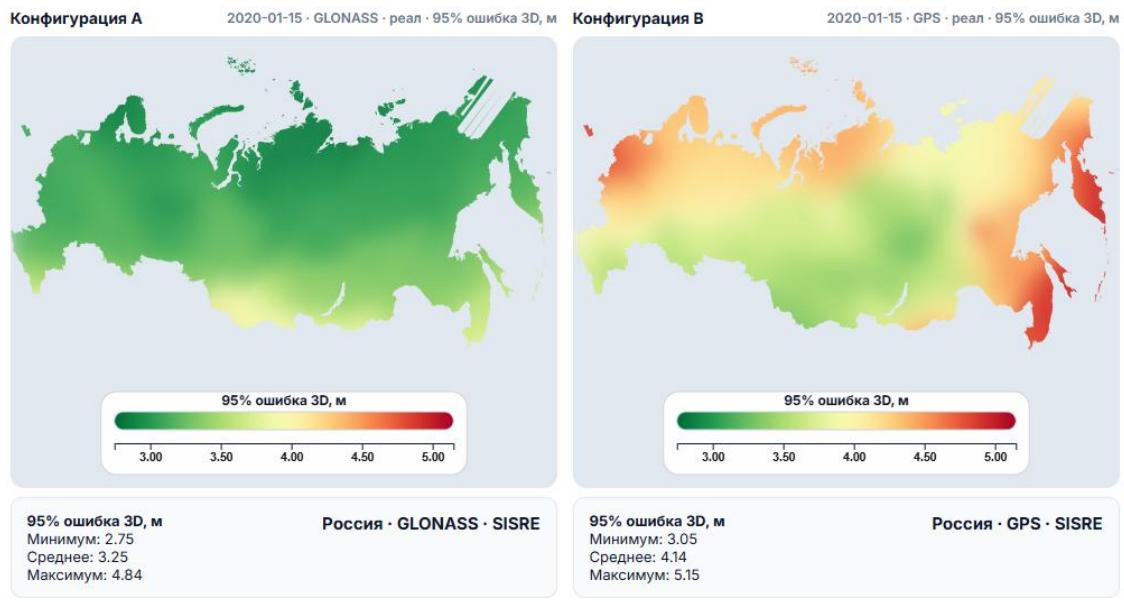


Рисунок 5.4 – Навигационное поле 95-процентной трёхмерной ошибки позиционирования по территории России: конфигурация GPS (справа) и ГЛОНАСС (слева), режим учёта реальных ошибок ЭВИ

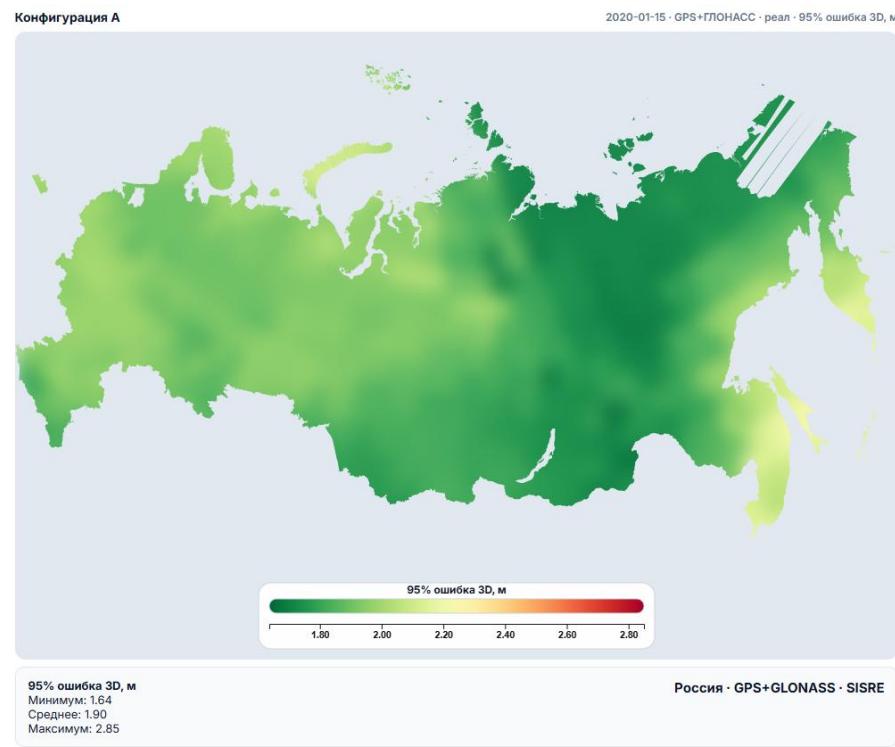


Рисунок 5.5 – Навигационное поле 95-процентной трёхмерной ошибки позиционирования по территории России при совместном использовании систем GPS и ГЛОНАСС.

Цветовая шкала на картах относительная: переход от зелёного к красному означает лишь изменение величины ошибки в ограниченном диапазоне (примерно от 2–3 до 5 м), а не «плохое» качество навигации в абсолютном смысле.

По России (рис. 5.4) для одиночных созвездий получены значения 95-процентной ошибки 3D порядка 3–5 м. При этом среднее значение для GPS составляет около 4,1 м, тогда как для ГЛОНАСС – около 3,3 м. Такое соотношение выглядит нетривиальным, учитывая более высокие величины SISRE для ГЛОНАСС, и объясняется более благоприятной геометрией его орбитальной группировки над территорией России. PDOP здесь в среднем ниже, что частично компенсирует большие ошибки сигнала. На карте хорошо видна пространственная неоднородность: несколько повышенные значения 95-процентной ошибки (оттенки жёлто-красного) локализуются на севере и востоке страны, однако даже там ошибка не превышает примерно 5 м.

Объединение двух систем даёт ожидаемый выигрыш (рис. 5.5). Для конфигурации GPS+ГЛОНАСС среднее значение 95-процентной 3D-ошибки по России снижается до ~1,9 м, а диапазон изменений по территории сужается до примерно 1,6–2,8 м. Поле становится значительно более однородным, исчезают области с выраженным ростом ошибки на краях покрываемой зоны. Это результат одновременно лучшей геометрии (большее число видимых НКА и меньший PDOP) и усреднения ошибок ЭВИ между системами.

На глобальном уровне, показанном на рисунке 5.6, одиночное созвездие ГЛОНАСС обеспечивает среднюю 95-процентную ошибку 3D около 3,6 м, причём наибольшие значения наблюдаются в высоких широтах южного полушария и в удалённых океанических областях.

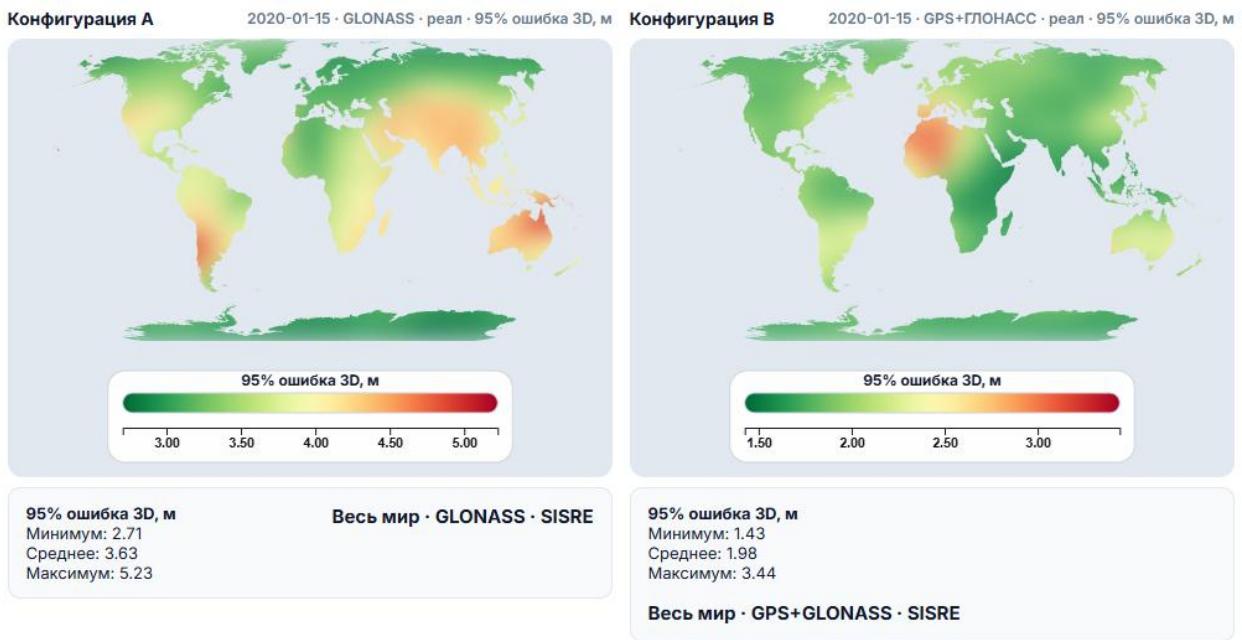


Рисунок 5.6 – Глобальное навигационное поле 95-процентной ошибки 3D: конфигурация ГЛОНАСС (слева) и совместная конфигурация GPS+ГЛОНАСС (справа).

При переходе к конфигурации GPS+ГЛОНАСС средняя ошибка снижается примерно до 2,0 м, максимум — до ~3,4 м, а пространственная структура поля становится заметно более равномерной. Особенно заметен выигрыш в регионах, где одна из систем по геометрическим причинам работает не оптимально: добавление второй системы «подстраховывает» геометрию и улучшает PDOP, что напрямую отражается на 95-процентной ошибке.

Карта доступности навигационного решения, показанная на рисунке 5.7, дополняет анализ.

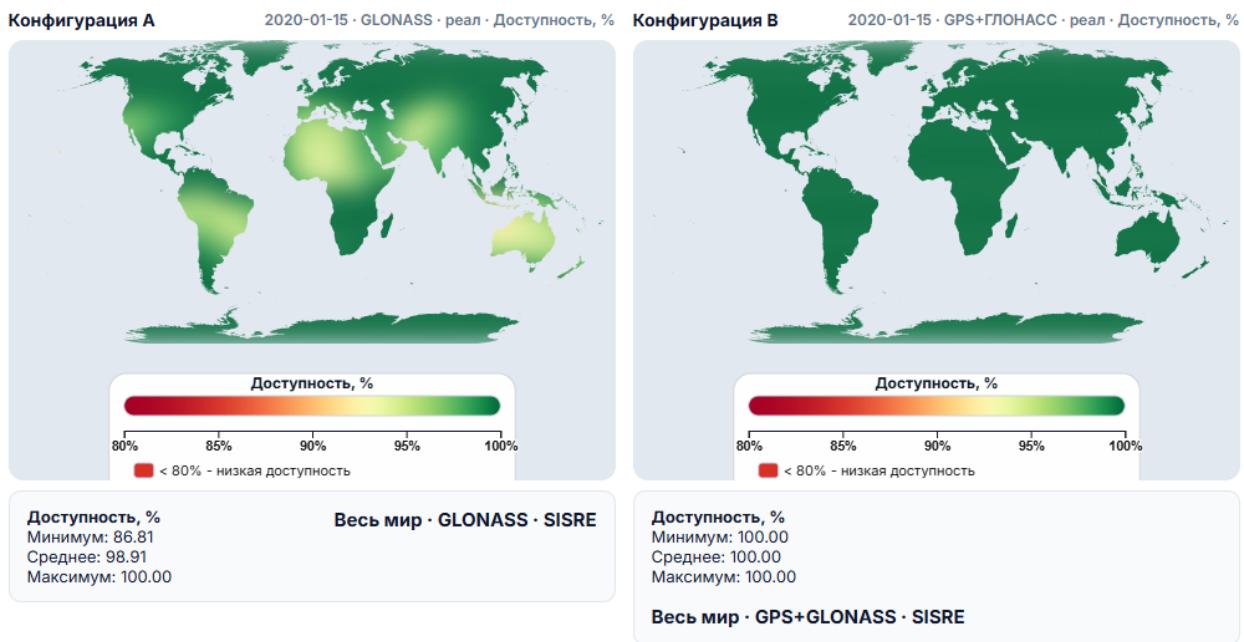


Рисунок 5.7 – Пространственное распределение доступности навигационного решения при совместном использовании систем GPS и ГЛОНАСС.

Для ГЛОНАСС минимальная доступность над сушей составляет около 86–90 %, среднее значение по миру — порядка 99 %. Области понижения доступности совпадают с районами ухудшения геометрии (ограниченное число НКА над горизонтом), но даже там система обеспечивает решение большую часть времени. Для конфигурации GPS+ГЛОНАСС доступность практически повсеместно стремится к 100 %, поскольку объединённая орбитальная группировка обеспечивает избыточное число наблюдаемых спутников в любой момент времени.

## 5.4 Выводы по разделу

Полученные в разделе 5 результаты показывают, что реализованный программный комплекс корректно воспроизводит расчётные показатели качества сигнала в пространстве. Суточные оценки SISRE и SISVE для GPS стабильно лежат на уровне порядка 1 м и нескольких мм/с соответственно, для ГЛОНАСС — примерно вдвое хуже по дальности и в 1,5–2 раза хуже по

скорости. Разброс значений по суткам невелик, а усреднённые характеристики хорошо согласуются с независимыми оценками ИАЦ, что подтверждает правильность реализации методики, корректность обработки файлов BRDC/SP3/CLK и выбора порогов фильтрации.

Расчёт навигационного поля показывает, как эти различия по SISRE/SISVE переходят в реальные показатели точности и доступности для пользователя. Для России 95-процентная трёхмерная ошибка при использовании только GPS и только ГЛОНАСС сопоставима по уровню, тогда как совместное применение двух систем снижает среднюю 95-процентную ошибку примерно в 1,5–2 раза и выравнивает её по территории; на глобальном уровне комбинация GPS+ГЛОНАСС также улучшает 3D-точность и доступность, причём «красные» области на картах отражают лишь небольшие относительные отличия в пределах нескольких метров. При этом программный комплекс поддерживает широкий набор дополнительных функций: выбор дат и регионов, переключение систем (GPS, ГЛОНАСС, их совместное использование), различные режимы расчёта, формирование отчётных таблиц и веб-визуализацию результатов. Это делает его удобным инструментом для регулярного мониторинга качества ЭВИ и навигационного поля в интересах анализа и эксплуатации навигационного обеспечения.

## **6 Экономическая часть**

Экономическая часть направлена на оценку целесообразности и эффективности выполнения научно-исследовательской работы (НИР), связанной с разработкой инструментария для анализа точности эфемеридно-временной информации и навигационного поля глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а также программного обеспечения, реализующего данный инструментарий.

Выбор НИР обусловлен исследовательским характером работы, ориентированным на получение новых методов и алгоритмов оценки точности навигационных данных. Разрабатываемое программное обеспечение служит инструментом научных исследований и не является готовым коммерческим продуктом, что определяет акцент на научной новизне и технической прогрессивности получаемых результатов.

### **6.1 Оценка научно-технической прогрессивности**

Оценка научно-технической прогрессивности проводится для определения степени соответствия разрабатываемого инструментария современному уровню технологий и его отличий от существующих решений.

Анализ выполняется на основе ориентировочных шкал, представленных в таблицах 6.1-6.2, включающих признаки научно-технического эффекта и показатели возможного периода и области применения результатов. На основании этих шкал устанавливаются баллы по каждому признаку и формируются исходные данные для расчёта интегрального показателя прогрессивности.

Таблица 6.1 – Ориентировочная шкала оценки признаков научно-технического эффекта НТП<sub>р</sub>, в баллах

Признак научно-технического эффекта НТП <sub>р</sub>	Возможное определение научно-технического эффекта НТП <sub>р</sub>	Оценка в баллах
Научно-технический уровень (новизна) НТП <sub>р</sub>	Превышает мировые достижения	9-10
	Находится на уровне мировых достижений	6-8
	Приближается к мировым достижениям	3-5
	Тривиальность	1-2
Перспективность	Первостепенная важность	8-10
	Важная	5-7
	Полезная	1-4

Таблица 6.2 – Ориентировочная шкала оценки возможности применения результатов НТП<sub>р</sub>, в баллах

Период возможного применения результатов НТП <sub>р</sub>	Область применения НТП <sub>р</sub>		
	Народное хозяйство (национальное)	Отрасль (промышленность)	Предприятие (организация)
До 3 лет	10	8	4
3-5 лет	8	7	3
6-10 лет	6	5	2
Более 10 лет	4	3	1

После выбора базы для сравнения по результатам оценки показателей качества результатов НИР заполняется таблица 6.3

Таблица 6.3 – Научно-технический эффект НТП<sub>р</sub>

Признак научно-технического эффекта НТПр	Значимость признаков научно-технического эффекта НТПр	Уровень свойств НТПр, выбранной за базу для сравнения	Уровень свойств НТПр, являющейся результатом дипломного проекта
Научно-технический уровень (новизна) НТПр	0,4	4	6
Перспективность НТПр	0,4	6	7
Возможность применения результатов НТПр	0,2	4	6

Индекс научно-технической прогрессивности  $J_{HTP}$  определяется по формуле:

$$J_{HTP} = \frac{H_{HTP\_H}}{H_{HTP\_B}},$$

где  $H_{HTP\_H}$  - обобщенный количественный показатель научно-технического уровня НТП<sub>р</sub>, являющейся результатом дипломного проекта,  $H_{HTP\_B}$  - обобщенный количественный показатель научно-технического уровня НТП<sub>р</sub>, выбранной за базу для сравнения.

$$H_{HTP\_H} = \frac{\sum_i Q_{Hi} R_i}{\sum_i R_i} = \frac{6 \cdot 0.4 + 7 \cdot 0.4 + 6 \cdot 0.2}{0.4 + 0.4 + 0.2} = 6.4$$

где  $Q_{Hi}$  - значение показателя  $i$ -го признака НТП<sub>р</sub>, являющейся результатом дипломного проекта, выраженное в баллах,  $R_i$  - значение весового коэффициента (значимость)  $i$ -го признака НТП<sub>р</sub>, выраженного волях единицы.

$$H_{\text{НТП\_Б}} = \frac{\sum_i Q_{B_i} R_i}{\sum_i R_i} = \frac{4 \cdot 0.4 + 6 \cdot 0.4 + 4 \cdot 0.2}{0.4 + 0.4 + 0.2} = 4.8$$

где  $Q_{B_i}$  - значение показателя  $i$ -го признака НТП<sub>p</sub>, выбранной за базу для сравнения, выраженное в баллах.

Итоговое значение индекса научно-технической прогрессивности составляет [7]:

$$J_{\text{НТП}} = \frac{H_{\text{НТП\_Н}}}{H_{\text{НТП\_Б}}} = \frac{6.4}{4.8} = 1,33$$

Полученное значение индекса научно-технической прогрессивности  $J_{\text{НТП}} = 1,33$  превышает единицу, что означает более высокий научно-технический уровень и перспективность рассматриваемой НТПр по сравнению с выбранным базовым вариантом. Тем самым подтверждается целесообразность выполнения НИР по разработке инструментария оценки точности эфемеридно-временной информации и навигационного поля ГНСС.

Новизна НТПр оценивается с помощью ряда критериев, указанных в таблице 6.4 с использованием метода балльных оценок и определяется соотношением:

$$\frac{B_K}{B_M},$$

где  $B_K$  - сумма набранных баллов,  $B_M$  - максимальная сумма баллов по всем критериям.

Таблица 6.4 – Ориентировочная шкала новизны предложений

Критерий новизны	Новизна				
	Принципиально новое	Новое	Улучшенное	Существующего уровня	Устаревшее
	Оценка новизны, баллы				
Функциональный	5	3	2	1	0
Технологический	5	3	2	1	0
Производственный	5	3	2	1	0
Социальный	5	3	2	1	0
Юридический	5	3	2	1	0

Рассчитаем новизну проводимой НИР:

$$N_{\text{НТП}} = \frac{B_K}{B_M} = \frac{3 + 3 + 2 + 2 + 2}{25} = 0.48$$

## 6.2. Оценка целесообразности разработки программного продукта

В рамках выполняемой НИР, помимо разработки методики оценки точности эфемеридно-временной информации и навигационного поля ГНСС, создаётся программный продукт, реализующий предложенный алгоритмический инструментарий. Поэтому в данном разделе, помимо оценки научно-технической прогрессивности НИР, дополнительно будет рассчитана целесообразность разработки программного продукта по показателям качества.

Для сравнения выбирается существующий программный комплекс и разрабатываемый в дипломном проекте программный продукт. Используются следующие характеристики качества: функциональная пригодность,

надёжность и эффективность. Характеристики и их значимость сведены в таблицу 6.5.

Таблица 6.5 – Характеристики качества программного продукта

Характеристика качества ПП	Единица	Аналог	Новый вариант	Вес
Функциональная пригодность	балл	7	9	0,25
Надёжность	балл	6	8	0,20
Эффективность вычислений	балл	7	9	0,20
Защищённость данных	балл	6	7	0,15
Сопровождаемость и переносимость программного кода	балл	6	8	0,20

Для количественной оценки используется относительное изменение показателей качества:

$$R_i = \frac{X_{N_i}}{X_{B_i}}$$

где  $X_{N_i}$  и  $X_{B_i}$  – значения i-й характеристики для нового ПП и аналога соответственно (для всех выбранных показателей «больше – лучше»).

Расчёт  $R_i$  и вклада  $w_i R_i$ :

$$\text{Функциональная пригодность: } R_1 = \frac{9}{7} \approx 1,29, \quad w_1 R_1 \approx 0,32;$$

$$\text{Надёжность: } R_2 = \frac{8}{6} \approx 1,33, \quad w_2 R_2 \approx 0,27;$$

$$\text{Эффективность вычислений: } R_3 = \frac{9}{7} \approx 1,29, \quad w_3 R_3 \approx 0,26;$$

$$\text{Защищённость данных: } R_4 = \frac{7}{6} \approx 1,17, \quad w_4 R_4 \approx 0,18;$$

$$\text{Переносимость кода: } R_5 = \frac{8}{6} \approx 1,33, \quad w_5 R_5 \approx 0,27.$$

Интегральный показатель качества программного продукта (аналог индекса технического уровня) определяется по формуле (2.9) методички:

$$I_{\text{ПП}} = \sum_{i=1}^n w_i R_i$$

Подставляя значения:

$$I_{\text{ПП}} = 0,32 + 0,27 + 0,26 + 0,18 + 0,27 = 1,30$$

Так как программный продукт является частью более общей системы (инструментарий оценки точности ГНСС), интегральный показатель корректируется коэффициентом влияния  $K_v$  ( $0 < K_v \leq 1$ ) по формуле методички. Для данной разработки принимается  $K_v=0,9$ . Тогда скорректированный показатель качества ПП:

$$I_{\text{ПП}}^{\text{кор}} = K_v \cdot I_{\text{ПП}} = 0,9 \cdot 1,30 = 1,17$$

По результатам расчёта индекса научно-технической прогрессивности получено значение  $J_{\text{НТП}} = 1,33$ , что указывает на более высокий уровень разрабатываемого инструментария по сравнению с выбранным базовым вариантом. НИР оправдана с точки зрения научно-технического эффекта и перспективности применения результата.

Интегральный показатель качества программного продукта, реализующего разработанные алгоритмы, с учётом коэффициента влияния составил  $I_{\text{ПП}}^{\text{кор}} = 1,17$ , что свидетельствует о его улучшенных функциональных и эксплуатационных характеристиках относительно аналога. Совокупно полученные значения подтверждают целесообразность выполнения НИР и разработки программного продукта в её рамках.

### 6.3 Планирование процесса выполнения разработки

Планирование процесса выполнения НИР включает определение состава работ по стадиям, распределение трудоёмкости между стадиями и

расчёт длительности выполнения разработки. Состав работ по НИР приведен в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Состав работ, выполняемых при проведении НИР

Наименование стадии работ	Выполняемые работы
Подготовительная стадия	Уточнение цели и задач, формирование требований к результатам работы алгоритма, сбор исходных данных и спецификаций.
Обзор литературы и теоретическое обоснование работы	Анализ отечественных и зарубежных методов оценки точности, изучение существующих моделей, формирование требований к разрабатываемому инструментарию.
Анализ математического аппарата и алгоритмов	Анализ используемой математических моделей для оценки точности ЭВИ и навигационного поля, разработка алгоритмов расчёта параметров точности и критериев сравнения с исходными данными.
Моделирование и программная реализация инструментария	Разработка структуры программного инструментария, реализация алгоритмов в виде модулей программного обеспечения, отладка вычислительных процедур на тестовых данных.
Анализ результатов	Проведение расчётных экспериментов, анализ полученных результатов, сравнение с базовыми методами.

Показатели трудовых затрат по каждому этапу работ приведены в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Структура трудовых затрат по отдельным стадиям НИР

№ стадии работ	Наименование стадии работ	Удельный вес трудоемкости стадии в общем объеме работ, %	Трудоемкость, чел-дн.
1	Подготовительная стадия	10	6
2	Обзор литературы и теоретическое обоснование работы	20	12
3	Моделирование спиральной антенны	25	15
4	Расчет характеристик антенны	25	15
5	Анализ результатов	20	12
Итого:		100	60

Разработка календарного плана осуществляется на основе данных о трудоемкости работ, связанных с дипломным проектом.

Расчет производственного цикла каждого j-го этапа работы производится в соответствии с формулой

$$T_{\mu_j} = \frac{T_j}{t_{\text{ПД}} \cdot q_j},$$

где  $T_j$  - трудоёмкость j-ой стадии, чел.-час;  $t_{\text{ПД}}$  - продолжительность рабочего дня, час.;  $q_j$  - количество работников, одновременно участвующих в выполнении работ на j-ой стадии работ. Результаты расчета производственного цикла представлены в таблице 6.8.

Производственный цикл этапа №1:

$$T_{\text{ц1}} = \frac{48}{8 * 1} = 6 \text{ (чел - час)}$$

$$T_{\text{кд1}} = 6 * 1,4 \approx 9 \text{ (к. д.)}$$

Производственный цикл этапа №2:

$$T_{\text{ц2}} = \frac{96}{8 * 1} = 12 \text{ (чел - час)}$$

$$T_{\text{кд2}} = 12 * 1,4 \approx 17 \text{ (к. д.)}$$

Производственный цикл этапа №3:

$$T_{\text{ц3}} = \frac{120}{8 * 1} = 15 \text{ (чел - час)}$$

$$T_{\text{кд3}} = 15 * 1,4 \approx 21 \text{ (к. д.)}$$

Производственный цикл этапа №4:

$$T_{\text{ц4}} = \frac{120}{8 * 1} = 15 \text{ (чел - час)}$$

$$T_{\text{кд4}} = 15 * 1,4 \approx 21 \text{ (к. д.)}$$

Производственный цикл этапа №5:

$$T_{\text{ц5}} = \frac{96}{8 * 1} = 12 \text{ (чел - час)}$$

$$T_{\text{кд5}} = 12 * 1,4 \approx 17 \text{ (к. д.)}$$

Таблица 6.8 – Расчет календарного плана работ

Наименование стадии работ	Удельный вес, %	Трудоемкость, чел-дн.	Количество исполнителей	Длительность стадии, календ. дни
Подготовительная стадия	10	6	1	9
Обзор литературы и теоретическое обоснование работы	20	12	1	17
Моделирование спиральной антенны	25	15	1	21
Расчет характеристик антенны	25	15	1	21
Анализ результатов	20	12	1	17
Итого:	100	60		85

В соответствии с таблицей построим директивный график выполнения работ, изображенный на рисунке 6.1:

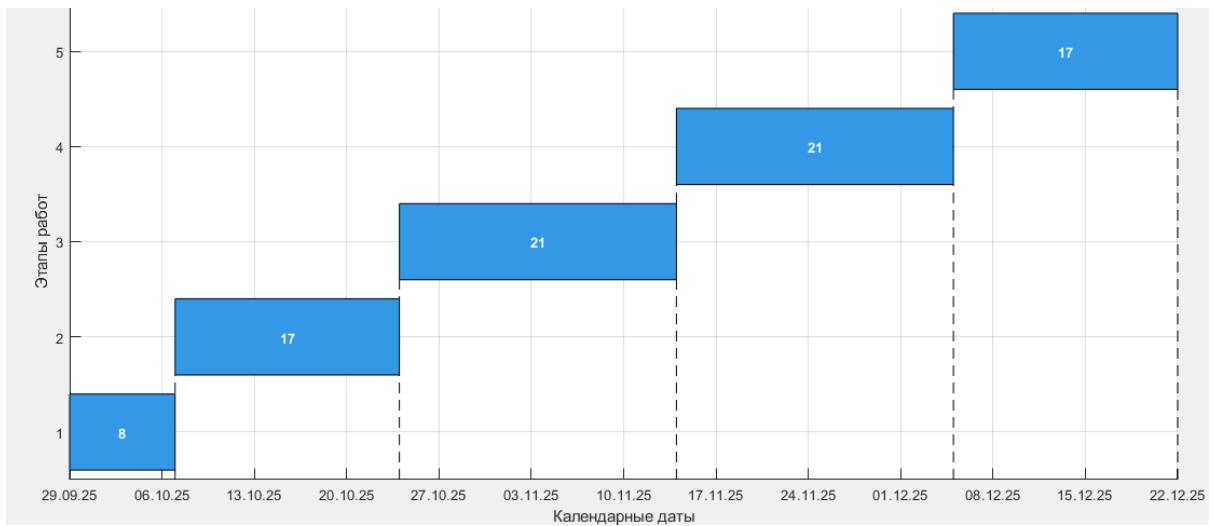


Рисунок 6.1 – Графическое представление календарного плана

#### 6.4 Построение и расчёт сетевого графа

Для оценки продолжительности НИР, необходимо оценить продолжительность отдельных этапов НИР. Для планирования работ в рамках НИР необходимо построить сетевой график, в котором будет указана последовательность выполнения работ специалистом.

Для оценки продолжительности этапов необходимо оценить  $t_{\text{HB}}$  по следующей формуле:

$$t_{\text{HB}} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5}$$

В таблице 6.9 приведён перечень всех работ и событий, для каждого из которых необходимо указать продолжительность. При этом рассматриваются три варианта оценки сроков: минимальная продолжительность, соответствующая идеальному стечению обстоятельств, максимальная — при неблагоприятном развитии ситуации, а также наиболее вероятная — в условиях нормальной работы.

Таблица 6.9 – Продолжительность выполняемых работ в сетевом графике

№ п/п	Наименование работы	Номер события		Продолжительность работы, дни		
		Начальное	Конечное	$t_{\min}$	$t_{\max}$	$t_{\text{нв}}$
1	Поиск источников	1	2	6	11	8
2	Формирование задания и требований к точности	1	3	7	12	9
3	Обзор и анализ существующих методов	3	4	12	17	14
4	Теоретическое обоснование выбора математической модели и алгоритма	4	5	14	19	16
5	Моделирование и программная реализация инструментария	5	6	16	21	18
6	Расчётные эксперименты, анализ результатов и оформление	6	7	18	23	20

Построим сетевой график. Основными элементами сетевого графика являются работа (ребро графа), событие (вершины графа). Полученный график представлен на рисунке 6.2.

Работа – определенный процесс, на который расходуется время и требуются затраты рабочей силы, материалов и других ресурсов.

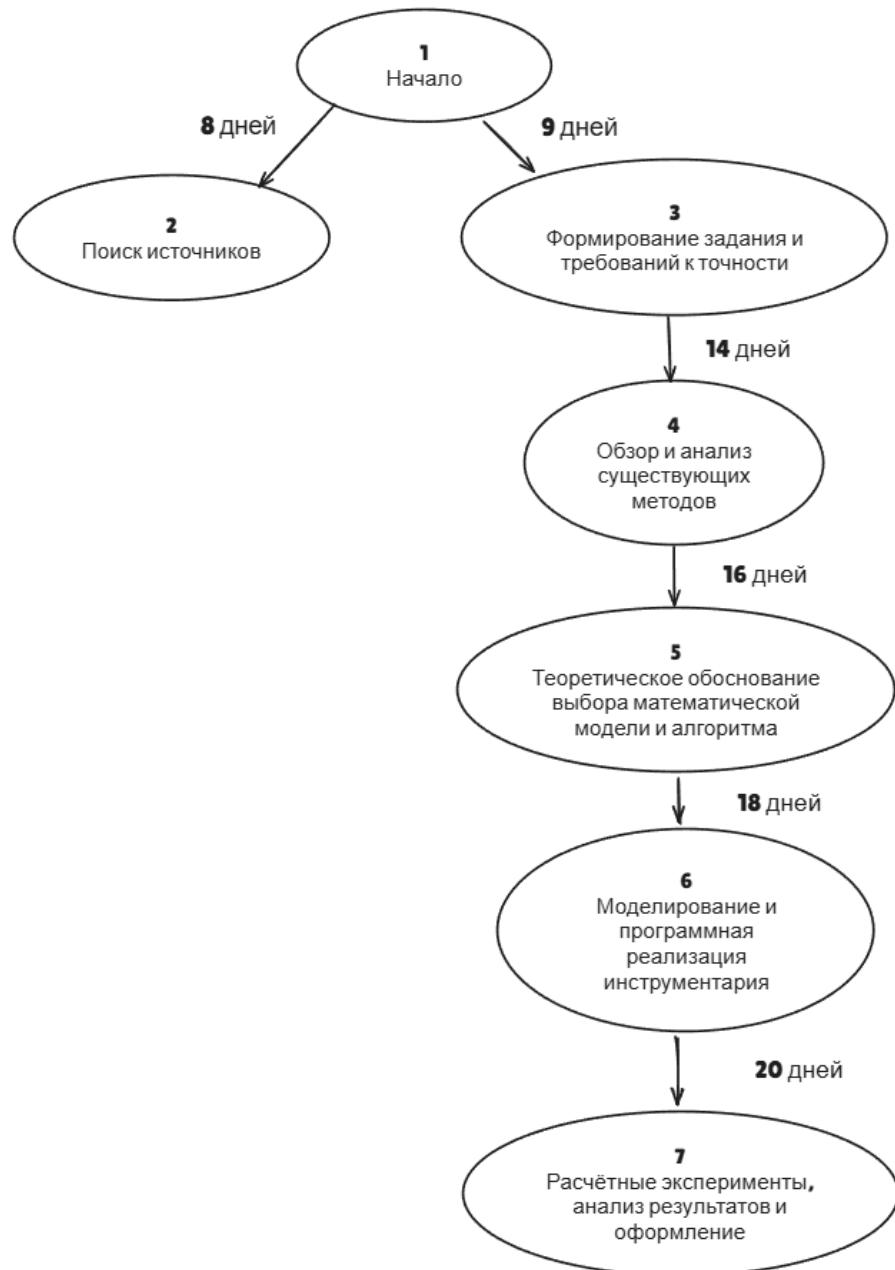


Рисунок 6.2 – Сетевой график

Рассчитаем продолжительность пути  $L$ , равной сумме продолжительности работ, составляющих этот путь. Путь наибольшей продолжительности называется критическим путем.

Ранний срок свершения события  $t_p(i)$  равен суммарной продолжительности работы на максимальном из путей, ведущих к данному событию от исходного события в сети, и определяется по формуле:

$$t_p(i) = \max \sum t_{hb}$$

Поздний срок свершения события  $t_\Pi(i)$  равен разности между продолжительностью критического пути и суммарной продолжительностью работ, лежащих на максимальном из путей, ведущих от данного события к завершающему событию сети. Данные параметры определяются следующим образом:

- самый ранний из возможных сроков начала работы:  $t_{ph}(ij) = t_p(i)$ ;
- самый поздний срок начала работы:  $t_{phn}(ij) = t_\Pi(j) - t(ij)$ ;
- самый ранний срок окончания работы:  $t_{po}(ij) = t_p(i) + t(ij)$ ;
- самый поздний срок окончания работы:  $t_{pon}(ij) = t_\Pi(j)$ .

Все события сети, кроме принадлежащих критическому пути, имеют резерв времени. Резерв времени обозначается  $R(i)$  и определяется как

$$R(i) = t_\Pi(i) - t_p(i)$$

Таблица 1.10 – Определение параметров сетевого графа

Шифр работы (ij)	$t(ij)$	$t_{ph}(ij)$	$t_{phn}(ij)$	$t_{po}(ij)$	$t_{pon}(ij)$	$R(i)$
1-2	8	0.0	0.0	8	8	0.0
1-3	9	8	8	17	17	0.0
3-4	14	17	17	31	31	0.0
4-5	16	31	31	47	47	0.0
5-6	18	47	47	65	65	0.0
6-7	20	65	65	85	85	0.0

Критический путь:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ .

Продолжительность критического пути:

$$t_{kp} = 85 \text{ дней.}$$

Ранний срок свершения события:

$$t_p(i) = \max \sum t_{ож}$$

$$t_p(1) = 0 = 0\text{-й день}$$

$$t_p(2) = 8 = 8\text{-й день}$$

$$t_p(3) = 8 + 9 = 17\text{-й день}$$

$$t_p(4) = 8 + 9 + 14 = 31\text{-й день}$$

$$t_p(5) = 8 + 9 + 14 + 16 = 47\text{-й день}$$

$$t_p(6) = 8 + 9 + 14 + 16 + 18 = 65\text{-й день}$$

$$t_p(7) = 8 + 9 + 14 + 16 + 18 + 20 = 85\text{-й день}$$

Поздний срок свершения события:

$$t_\Pi(i) = t_{kp} - \sum t_{max}$$

$$t_\Pi(1) = 85 - 85 = 0\text{-й день}$$

$$t_\Pi(2) = 85 - 77 = 8\text{-й день}$$

$$t_\Pi(3) = 85 - 68 = 17\text{-й день}$$

$$t_\Pi(4) = 85 - 54 = 31\text{-й день}$$

$$t_\Pi(5) = 85 - 72 = 47\text{-й день}$$

$$t_\Pi(6) = 85 - 20 = 65\text{-й день}$$

$$t_\Pi(7) = 85 - 0 = 85\text{-й день}$$

Самый ранний из возможных сроков начала работы:

$$t_{PH}(ij) = t_p(i)$$

$$t_{PH}(1 - 2) = 0\text{-й день}$$

$$t_{PH}(2 - 3) = 8\text{-й день}$$

$$t_{PH}(3 - 4) = 17\text{-й день}$$

$$t_{PH}(4 - 5) = 31\text{-й день}$$

$$t_{\text{PH}}(5 - 6) = 47\text{-й день}$$

$$t_{\text{PH}}(6 - 7) = 65\text{-й день}$$

$$t_{\text{PH}}(7 - 8) = 26\text{-й день}$$

$$t_{\text{PH}}(8 - 9) = 51\text{-й день}$$

$$t_{\text{PH}}(9 - 10) = 65\text{-й день}$$

Самый поздний срок начала работы:

$$t_{\text{ПН}}(ij) = t_{\text{п}}(j) - t(ij)$$

$$t_{\text{ПН}}(1 - 2) = 8 - 8 = 0\text{-й день}$$

$$t_{\text{ПН}}(2 - 3) = 17 - 9 = 9\text{-й день}$$

$$t_{\text{ПН}}(3 - 4) = 31 - 14 = 17\text{-й день}$$

$$t_{\text{ПН}}(4 - 5) = 47 - 16 = 31\text{-й день}$$

$$t_{\text{ПН}}(5 - 6) = 65 - 18 = 47\text{-й день}$$

$$t_{\text{ПН}}(6 - 7) = 85 - 20 = 65\text{-й день}$$

Самый ранний срок окончания работы:

$$t_{\text{po}}(ij) = t_{\text{p}}(i) + t(ij)$$

$$t_{\text{po}}(1 - 2) = 0 + 8 = 8\text{-й день}$$

$$t_{\text{po}}(2 - 3) = 8 + 9 = 17\text{-й день}$$

$$t_{\text{po}}(3 - 4) = 17 + 14 = 31\text{-й день}$$

$$t_{\text{po}}(4 - 5) = 31 + 16 = 47\text{-й день}$$

$$t_{\text{po}}(5 - 6) = 47 + 18 = 65\text{-й день}$$

$$t_{\text{po}}(6 - 7) = 65 + 20 = 85\text{-й день}$$

Самый поздний срок окончания работы:

$$t_{\text{po}}(ij) = t_{\text{п}}(j)$$

$$t_{\Pi_0}(1 - 2) = 8\text{-й день}$$

$$t_{\Pi_0}(2 - 3) = 17\text{-й день}$$

$$t_{\Pi_0}(3 - 4) = 31\text{-й день}$$

$$t_{\Pi_0}(4 - 5) = 47\text{-й день}$$

$$t_{\Pi_0}(5 - 6) = 65\text{-й день}$$

$$t_{\Pi_0}(6 - 7) = 85\text{-й день}$$

Все события сети, за исключением событий, принадлежащих критическому пути, имеют резерв времени. Резерв времени события  $i$  обозначается  $R(i)$  и определяется как разница между поздним и ранним сроками наступления данного события  $i$ :

$$R(i) = t_{\Pi}(i) - t_P(i)$$

$$R(1) = 0 - 0 = 0 \text{ дней}$$

$$R(2) = 8 - 8 = 0 \text{ дней}$$

$$R(3) = 17 - 17 = 0 \text{ дней}$$

$$R(4) = 31 - 31 = 0 \text{ дней}$$

$$R(5) = 47 - 47 = 0 \text{ дней}$$

$$R(6) = 65 - 65 = 0 \text{ дней}$$

$$R(7) = 85 - 85 = 0 \text{ дней}$$

## 6.5 Определение затрат, себестоимости и цены проводимой НИР

Первым этапом определения затрат на разработку является расчет заработной платы персонала по  $j$ -му этапу работ, который определяется формулой:

$$Z_{3\Pi j} = T_j \cdot \overline{\tau}_j,$$

где  $T_j$  - трудоемкость  $j$ -ой стадии работ;  $\bar{\tau}_j$  - средняя дневная тарифная ставка оплаты работ  $j$ -ой стадии.

Трудоемкость этапа работ, измеряемая в человеко-днях (чел.-дн.), берется по результатам расчетов трудоемкости, сведенных в таблице, дневные ставки исполнителей в разрезе их должностей – по данным преддипломной практики с учетом существующей отраслевой системы оплаты труда. Результаты расчетов затрат на оплату труда основных исполнителей приведены в таблице 6.11.

Таблица 6.11 – Расчет заработной платы персонала

№ стадии работ	Трудоемкость стадии (чел.-дн.)	Исполнители		Дневная ставка (руб.)	Средняя дневная ставка (руб.)	Заработн ая плата (руб.)
		Должность	Численность (чел.)			
1	6	Инженер	1	3600	3600	21600
2	12	Инженер	1	3600	3600	43200
3	15	Инженер	1	3600	3600	54000
4	15	Инженер	1	3600	3600	54000
5	12	Инженер	1	3600	3600	43200
Итого:						216000

Заработка плата с учетом премии:

$$216000 \cdot 1.2 = 259200 \text{ руб.}$$

Укрупненная структура затрат на НИР представлена в таблице 6.12.

Таблица 6.12 – Поэлементная укрупненная структура затрат на НИР

Наименование элементов затрат	Затраты (руб.)
Заработка плата исполнителей (основная и дополнительная)	259200
Расходы на социальные нужды	65232
Накладные расходы	432000
Прочие расходы	25920
Итого:	739152

Расходы на социальные отчисления приняты в размере 30,2 % и представляют собой обязательные страховые взносы работодателя во внебюджетные фонды. Из них 22 % перечисляются в Пенсионный фонд РФ, 5,1 % – в систему обязательного медицинского страхования, 2,9 % – в Фонд социального страхования и 0,2 % – на страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний. Эти суммы полностью уплачиваются за счёт средств организации и не удерживаются из заработной платы сотрудников. В смете НИР данная статья выделена отдельно и составляет 8,9 % совокупных затрат, что подчёркивает её весомую долю в структуре расходов.

Прочие расходы включают приобретение расходных материалов (картриджей, офисной бумаги, канцелярских принадлежностей) и относятся к вспомогательным, но необходимым затратам, обеспечивающим нормальные условия работы исполнителей.

Накладные расходы формируют основную часть бюджета и охватывают арендную плату за помещения, оплату коммунальных услуг (электроэнергия, водоснабжение, отопление, связь и интернет), амортизацию оборудования (компьютеров, оргтехники, мебели), а также затраты на обслуживание техники и уборку помещений.

Таким образом, затраты на создание НТП<sub>р</sub> ( себестоимость НТП<sub>р</sub>):

$$Z_{HTP_pH} = 739152 \text{ руб.}$$

Цена НИР определяется исходя из принципа обеспечения безубыточности деятельности организации, получения прибыли, позволяющей выплатить обязательные платежи в бюджет и инвестировать расширение деятельности. Цена первоначальной продажи ЦНИР определяется по формуле [7]:

$$Ц_{HTP_p}^* = Z_{HTP_p} + \frac{ЗП_n \cdot \rho_{зп}}{100},$$

где  $Z_{HTP_p}$  - затраты на создание НИР;  $ЗП_n$  - заработка плата основных исполнителей;  $\rho_{зп}$  - уровень рентабельности (прибыли по отношению к оплате труда персонала), обеспечивающий безубыточность деятельности.

Примем уровень рентабельности  $\rho_{зп} = 220\%$  и найдем цену предложения:

$$Ц_{HTPr}^* = 739152 + \frac{216000 \cdot 220}{100} = 1214352 \text{ руб.}$$

## **6.6 Определение и оценка показателей экономической эффективности**

Основными ключевыми показателями общей экономической эффективности в основном являются:

- основной экономический эффект;
- высокий уровень экономической эффективности;
- общий срок окупаемости вложений.

Экономический эффект в целом определяется как значительная экономия на текущих операционных затратах. Годовой экономический эффект от НИР в первую очередь определяется в зависимости от специфики характера проводимого научного исследования. Экономический эффект от НИР,

которые напрямую связаны с существенным повышением качества проектирования (например, увеличение общего числа ключевых параметров расчёта, задание более жёстких и строгих требований к проектируемому объекту и т.п.)  $\mathcal{E}_{\text{НИР/НТП}}$ :

$$\mathcal{E}_{\text{НИР/НТП}} = \frac{Z_{\text{НТП}_pB} \cdot J_{\text{НТП}} - Z_{\text{НТП}_pH}}{T_H}$$

$$\mathcal{E}_{\text{НИР/НТП}} = \frac{1214352 * 1,33 - 739152}{1} = 875936,16$$

где  $Z_{\text{НТП}_pB}$  — затраты на выполнение темы прототипа, руб.;

$Z_{\text{НТП}_pH}$  - затраты на создание НТП (себестоимость НТП);

$T_H$  — продолжительность разработки новой темы, лет;

$J_{\text{НТП}}$  — уровень технической прогрессивности техники и технологического процесса;

Уровень экономической эффективности затрат на НИР при использовании ее результатов на этапе производства ( $E_{\text{НИР/np}}$ ):

$$E_{\text{НИР/np}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{НИР/np}} \beta}{I_{\text{НИР.H}}}$$

где  $\beta$  - коэффициент долевого участия разработчика в получении ожидаемого  $E_{\text{НИР/np}}$ .

$$E_{\text{НИР/np}} = \frac{875936,16 * 1}{1214352} = 0,72$$

где  $\gamma$  - коэффициент долевого участия разработчика.

Тогда срок окупаемости вложений в создание новой техники будет [7]:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_{3_{ПР}}} = \frac{1}{0,72} = 1,38 \text{ года}$$

## **Вывод к экономической части**

По результатам расчётов установлено, что разрабатываемая НИР и связанного с ним программного продукта является обоснованным, как с научно-технической, так и с экономической точки зрения. Индекс научно-технической прогрессивности  $J_{нтп} \approx 1,33$  подтверждает, что разрабатываемый подход превосходит базовый вариант по уровню технических решений.

Сметная стоимость НИР определена поэлементным методом с учётом заработной платы исполнителей, отчислений на социальные нужды, накладных и прочих расходов и составила около 1,13 млн руб.

Расчёт экономической эффективности показывает, что годовой экономический эффект от внедрения результатов НИР составляет порядка  $E_{НИР/пр} = 0,72$ , а срок окупаемости вложений — около 1,4 года. Это означает, что затраты на выполнение НИР и разработку программного продукта возмещаются в достаточно короткий период эксплуатации, а дальнейшее использование разработанного инструментария приводит к чистой экономии ресурсов по сравнению с базовым вариантом.

## **7 Охрана труда и окружающей среды**

### **Введение**

Раздел описывает условия труда при выполнении вычислительных, аналитических и программных работ по разработке инструментария для оценки точности эфемеридно-временной информации и навигационного поля ГНСС и программного обеспечения для реализации этого инструментария.

Исполнитель проводит все расчеты, моделирование, обработку данных, разработку и отладку программ на персональном компьютере в офисном помещении. Рабочее место включает стандартную вычислительную технику, оргтехнику и сетевое оборудование. В разделе оценивает влияние производственных факторов на безопасность и состояние здоровья пользователя при работе с указанным оборудованием.

#### **7.1 Характеристика производственного помещения**

Рабочие места размещены в отдельном офисном помещении административного здания. Помещение имеет прямоугольную форму размерами  $6 \times 4$  м, общей площадью  $24 \text{ м}^2$  при высоте 2,7 м. Расчётный объём помещения составляет  $64,8 \text{ м}^3$ . В помещении организовано два рабочих места с персональными компьютерами и периферийным оборудованием, за которыми работают два человека.

Обратимся к санитарным правилам СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда» [12]. В соответствии с пп. 5.1–5.2 минимальная площадь помещений для одного работника вне зависимости от вида выполняемых работ должна составлять не менее  $4,5 \text{ м}^2$ , а минимальный объём помещений на одного работника (для постоянных рабочих мест) при выполнении лёгкой физической работы категории энергозатрат Ia–Iб (к которой относится офисная работа с ПЭВМ) — не менее  $15 \text{ м}^3$ .

В рассматриваемом помещении удельная площадь на одного работника составляет  $24/2 = 12 \text{ м}^2$ , а удельный объём равен  $64,8/2 = 32,4 \text{ м}^3$ , что более чем вдвое превышает установленные санитарные нормативы по площади и объёму воздуха.

С учётом приведённых расчётов можно сделать вывод, что геометрические характеристики помещения и плотность размещения рабочих мест соответствуют действующим санитарным правилам, регламентирующим организацию офисных помещений с персональными электронно-вычислительными машинами.

## 7.2 Характеристика производственного оборудования

Рабочие места оснащены вычислительной и оргтехнической техникой, обеспечивающей выполнение программных и исследовательских задач на персональных компьютерах. В состав оборудования входят системные блоки с периферийными устройствами, жидкокристаллические мониторы, стандартные клавиатуры и мыши, лазерный принтер, источник бесперебойного питания и комплект сетевого оборудования. Технические характеристики основных устройств, используемые далее при расчёте тепловыделений и нагрузок на электросеть, сведены в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Состав и характеристики оборудования

Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Потребляемая мощность, Вт	Назначение	Примечание
Системный блок	2	230	Выполнение вычислений и моделирования	Используется при разработке ПО
Монитор ЖК	2	35	Отображение графической информации	Диагональ 23 дюйма

## Продолжение таблицы 7.1

Клавиатура и компьютерная мышь	2 комплекта	5	Управление ПК	Подключение по USB
Принтер лазерный	1	300	Печать расчетных и текстовых материалов	Скорость печати 20 стр/мин
Источник бесперебойного питания	1	100	Поддержание питания при сбое сети	Автономная работа до 10 мин
Сетевое оборудование	1 комплект	60	Обеспечение локального соединения	Поддержка протоколов Ethernet

Обратимся к санитарным правилам СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда» [12]. Для рабочих мест с ПЭВМ в данном документе установлено, что состав и размещение оборудования должны обеспечивать соблюдение гигиенических нормативов по микроклимату, уровню шума, освещённости, электромагнитным полям и химическим факторам. Лазерный принтер и системные блоки рассматриваются как источники шума, тепла и, при печати, загрязнения воздушной среды, поэтому их количество и мощность учитываются при оценке микроклимата и уровня шума в соответствующих подразделах. Применение малошумных системных блоков и ЖК-мониторов с низким энергопотреблением позволяет выполнять требования СП 2.2.3670-20 по ограничению неблагоприятных факторов.

С точки зрения электробезопасности эксплуатация компьютерной и сетевой техники должна соответствовать системе стандартов безопасности труда. В соответствии с ГОСТ 12.1.019-2017 «Электробезопасность. Общие

требования и номенклатура видов защиты» [17] для электроустановок до 1000 В применяются защитное заземление, автоматическое отключение питания, двойная или усиленная изоляция. ГОСТ 12.1.030-81 «Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление» [18] регламентирует присоединение металлических корпусов системных блоков и источника бесперебойного питания к защитному проводнику сети, а ГОСТ Р 12.1.038-2024 «Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» [22] устанавливает допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийных режимах. В составе оборудования на рабочем месте реализованы следующие меры: заземление корпусов стационарных устройств, питание части периферии (маршрутизатор и т.п.) от низковольтных блоков питания с двойной изоляцией, защита цепей через сетевой фильтр и источник бесперебойного питания.

По данным таблицы 1 суммарная установленная мощность оборудования составляет  $P = 2 \cdot 230 + 2 \cdot 35 + 2 \cdot 5 + 300 + 100 + 60 = 1000\text{Вт}$ . При напряжении сети 220 В рабочий ток не превышает 5 А, что не приводит к перегрузке групповой линии и соответствует требованиям ПУЭ к розеточным группам. Таким образом, состав оборудования, его мощность и принятые меры электробезопасности обеспечивают безопасную эксплуатацию рабочих мест инженера и соответствуют требованиям.

### **7.3 Характеристика производственных процессов**

Производственный процесс связан с выполнением вычислительных, аналитических и программно-технических работ по разработке инструментария для оценки точности эфемеридно-временной информации и навигационного поля ГНСС. Работа относится к категории преимущественно умственного труда с длительным использованием ПЭВМ.

**Основные этапы процесса:**

- сбор, анализ и предварительная обработка исходных данных;
- математическое моделирование и расчёт параметров навигационного поля;
- разработка, тестирование и отладка программных модулей;
- анализ полученных результатов и оценка их достоверности;
- оформление отчётных материалов и подготовка документации.

Обратимся к СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда» [12], согласно которому работы с применением ПЭВМ характеризуются повышенной зрительной и нервно-эмоциональной нагрузкой, а также требуют регламентации режимов труда и отдыха. Гигиенические нормативы факторов среды (микроклимат, шум, химические вещества и др.) устанавливаются СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [13]. Классификация факторов производственной среды и трудового процесса выполняется по Классификатору вредных и опасных производственных факторов, приведённому в Методике СОУТ (приказ Минтруда России от 21.11.2023 № 817н [28].

**На данном рабочем месте учитываются:**

- физические факторы: освещённость, параметры микроклимата и воздуха рабочей зоны, уровень шума от компьютерной и печатающей техники, электробезопасность, пожароопасность при эксплуатации электрооборудования;
- психофизиологические факторы: умственное и эмоциональное напряжение, монотонность операций, напряжённость зрительного анализатора при работе с ПЭВМ.

Биологические факторы для данного вида деятельности не характерны. В последующих подразделах по указанным факторам выполняется оценка условий труда и отнесение их к соответствующим классам.

## **7.4 Оценка условий труда инженера**

Оценка условий труда на рабочем месте инженера проведена по Методике специальной оценки условий труда, утвержденной приказом Минтруда России № 817н [28], с сопоставлением фактических показателей с гигиеническими нормативами СанПиН 1.2.3685-21 [13] и требованиями к воздуху рабочей зоны по ГОСТ 12.1.005-88 [3].

### **7.4.1 Оценка тяжести трудового процесса**

По характеру выполняемых работ деятельность инженера-разработчика относится к лёгким физическим работам категории Ia. В СП 2.2.3670-20 к категории Ia относят работы, выполняемые сидя, с низкой интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт) и незначительным физическим напряжением [12; 14].

Оценка тяжести трудового процесса выполнена в соответствии с Методикой проведения специальной оценки условий труда и Классификатором вредных и (или) опасных производственных факторов, утверждёнными приказом Минтруда России от 21.11.2023 № 817н [28]. В разделе 4 Классификатора фактор «тяжесть трудового процесса» оценивается по показателям 4.1–4.7: физическая динамическая нагрузка, масса поднимаемого и перемещаемого груза вручную, стереотипные рабочие движения, статическая нагрузка, рабочая поза, наклоны корпуса и перемещение в пространстве.

Для рабочего места инженера физическая динамическая нагрузка и масса поднимаемых грузов минимальны: подъём и перенос тяжестей более 1–2 кг не выполняется, перемещаются только документы и мелкие предметы.

Количество стереотипных движений кистей и пальцев при работе с клавиатурой и мышью не превышает 20 000 за смену, что по таблице «Стереотипные рабочие движения при локальной нагрузке» (показатель 4.3) соответствует 1 классу. Статическое напряжение невелико: работа выполняется сидя на регулируемом кресле, без длительного удержания значительных усилий; по показателю 4.4 это также не выходит за рамки 1 класса. Рабочая поза преимущественно удобная – сидя, с возможностью свободной смены позы и опорой стоп на пол, выражено вынужденные положения отсутствуют; наклоны корпуса более 30° выполняются не более 50 раз за смену, что по показателю 4.6 соответствует 1 классу. Перемещение в пространстве ограничено зоной рабочего места и краткими подходами к принтеру и шкафам, суммарный путь существенно ниже пороговых значений для 2 класса по показателю 4.7.

Таким образом, по всем нормируемым показателям тяжести трудового процесса фактические значения не превышают пределов, отнесённых Классификатором к 1 классу условий труда. Тяжесть трудового процесса на рабочем месте инженера относится к классу 1 (оптимальные условия труда) по приказу Минтруда России № 817н [28].

#### **7.4.2 Оценка напряженности трудового процесса**

Напряжённость трудового процесса на рабочем месте инженера оценивается в соответствии с Методикой проведения специальной оценки условий труда и Классификатором вредных и (или) опасных производственных факторов, утверждёнными приказом Минтруда России от 21.11.2023 № 817н [28]. Согласно разделу 5 Классификатора и приложению 14 Методики учёту подлежат следующие показатели: плотность сигналов и сообщений, число производственных объектов одновременного наблюдения, работа с оптическими приборами (монитором), нагрузка на голосовой аппарат,

а также монотонность нагрузок (число элементов операций и доля пассивного наблюдения за ходом процесса).

На рабочем месте инженера за счёт постоянной работы с ПЭВМ плотность воспринимаемых и передаваемых сигналов (сообщения на экране, команды, диагностические сообщения) составляет около 180 в час, что по таблице приложения 14 относится к вредному подклассу 3.1 (диапазон 176–300 сигналов/ч). Время работы за монитором превышает 60% продолжительности смены (около 5 часов из 8), то есть по показателю «работа с оптическими приборами» также соответствует подклассу 3.1 (51–75 % времени смены). Одновременно контролируется, как правило, не более 3–4 окон и объектов (программы, документы, графики), что по показателю «число производственных объектов одновременного наблюдения» укладывается в диапазон 1 класса (до 5 объектов). Речевые нагрузки ограничиваются краткими служебными переговорами; суммарное время разговоров существенно меньше 16 ч в неделю, поэтому по показателю нагрузки на голосовой аппарат условия труда относятся к 1 классу. Работа включает разнообразные операции (число элементов в типичном задании более 10), пассивное наблюдение за ходом процесса занимает менее 75 % времени смены, что по показателям монотонности нагрузок также соответствует 1 классу.

Таким образом, при наличии нескольких показателей напряжённости трудового процесса, отнесённых приложением 14 Методики СОУТ к вредному подклассу 3.1 (плотность сигналов и работа с оптическими приборами), в соответствии с приказом Минтруда России № 817н итоговый класс по фактору «напряжённость трудового процесса» на рабочем месте инженера устанавливается как подкласс 3.1 (вредные условия труда 1 степени).

### **7.4.3 Микроклимат рабочего помещения**

Микроклимат рабочей зоны оценивается по температуре воздуха, относительной влажности и скорости движения воздуха в соответствии с ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [14] и СанПиН 1.2.3685-21 [13]. Для целей специальной оценки условий труда идентификация и отнесение фактора «микроклимат» к классу условий труда выполняются по Методике проведения СОУТ, утверждённой приказом Минтруда России от 21.11.2023 № 817н [17]. Нормативные значения параметров микроклимата при этом принимаются по таблице 5.2 СанПиН 1.2.3685-21, включённой в приложение 5 Методики СОУТ.

Работа инженера относится к лёгким физическим работам категории Ia (энергозатраты до 139 Вт, порядка 120 ккал/ч), для которой оптимальные и допустимые значения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в холодный и тёплый периоды года приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений

Период года	Категория работ	Температура, С				Относительная влажность, %	Скорость движения, м/с		
		допустимая		на рабочих местах	оптимальная				
		верхняя граница	нижняя граница						
Холодный период	Легкая - Ia	22-24	25	26	21	18	40-60	75	
Теплый период	Легкая - Ia	23-25	28	30	22	20	40-60	55 (при 28 °C)	

Фактические параметры микроклимата в помещении, где размещено рабочее место инженера, представлены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Фактические параметры микроклимата в помещении

Условия измерения	Температура воздуха, °C	Влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный период	22	45	0,1
Теплый период	24	50	0,1

Все полученные значения находятся в пределах оптимальных диапазонов, установленных таблицей 2 СанПиН 1.2.3685-21 [13] для категории работ Ia.

Согласно приложению 5 Методики СОУТ для категории работ Ia фактические параметры микроклимата рабочего места инженера оцениваются следующим образом:

– температура воздуха: в холодный период  $t = 22^{\circ}\text{C}$ , в тёплый период  $t = 24^{\circ}\text{C}$ . Для категории Ia диапазон  $22,0\text{--}24,0^{\circ}\text{C}$  отнесён к 1 классу (оптимальные условия), поэтому оба фактических значения соответствуют 1 классу;

– скорость движения воздуха: в оба периода  $v = 0,1 \text{ м/с}$ . В приложении 5 скорость не более  $0,1 \text{ м/с}$  при нормальных температуре и влажности также относится к 1 классу, следовательно, фактическое значение соответствует 1 классу;

– относительная влажность воздуха: в холодный период  $\varphi = 45\%$ , в тёплый период  $\varphi = 50\%$ . Для диапазона  $40\text{--}60\%$  приложение 5 устанавливает 1 класс, тогда как значения  $15\text{--}39\%$  и  $61\text{--}75\%$  относятся ко 2 классу, а менее  $15\%$  и менее  $10\%$  – к вредным подклассам 3.1 и 3.2. Таким образом, фактические значения влажности также соответствуют 1 классу.

Следовательно, по температуре, влажности и скорости движения воздуха микроклимат на рабочем месте инженера полностью удовлетворяет требованиям приложения 5 Методики СОУТ и относится к 1 классу условий труда (оптимальные условия).

С учётом сопоставления всех показателей с требованиями СанПиН 1.2.3685-21 и приложением 5 Методики СОУТ фактор «микроклимат» на рабочем месте инженера относится к 1 классу условий труда (оптимальные условия).

#### **7.4.4 Уровень шума на рабочем месте**

Нормирование шума на рабочих местах выполняется в соответствии с ГОСТ 12.1.003-2014 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» [15], а гигиенические нормативы уровней звука устанавливаются СанПиН 1.2.3685-21 [13] и СП 51.13330.2011 «Защита от шума» [24]. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 предельно допустимый эквивалентный уровень звука для 8-часовой смены составляет  $L_{Aeq,T} = 80$  дБА. Для офисных помещений СП 51.13330.2011 (таблица 1, поз. 13) устанавливает более жёсткий норматив: эквивалентный уровень  $L_{Aeq} \leq 50$  дБА и максимальный уровень  $L_{Amax} \leq 65$  дБА.

Для того чтобы оценить суммарный эквивалентный уровень шума от нескольких источников, используется принцип энергетического суммирования согласно ГОСТ 12.1.003-2014 [17]. Измерения, выполненные по методике ГОСТ 12.1.003-2014 [15] с использованием шумомера 2-го класса, показали:

- от системного блока на рабочем месте – 33 дБА;
- от работающего принтера – 43 дБА;

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} \right)$$

где  $L_i$  – уровень звука  $i$ -го источника, дБА;  $n$  – количество источников

Рассчитаем суммарный уровень шума при одновременной работе компьютера и принтера:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg(10^{0,1*33} + 10^{0,1*43}) = 43,41 \text{ дБА}$$

- суммарный эквивалентный уровень звука в помещении – 44 дБА.

В таблице 7.4 приведено сопоставление фактического уровня шума в помещении с нормативами СП 51.13330.2011 [24] и СанПиН 1.2.3685-21 [13].

Таблица 7.4 – Сопоставление фактических уравнений шума с нормативами

Показатель	Норматив	Нормативный документ	Фактическое значение	Вывод
Эквивалентный уровень звука в помещении офиса, $L_{Aeq}$ , дБА	$\leq 50$	СП 51.13330.2011, (табл. 1, поз. 13)	45	Требование выполняется
Эквивалентный уровень звука на рабочем месте, $L_{Aeq,T}$ , дБА	$\leq 80$	СанПиН 1.2.3685-21	45	Значительно ниже гигиенического ПДУ

Таким образом, измеренный по ГОСТ 12.1.003-2014 [15] эквивалентный уровень звука  $L_{pA,eq,T} = 45$  дБА ниже как гигиенического предельно допустимого уровня 80 дБА по СанПиН 1.2.3685-21 [13], так и более жёсткого норматива 50 дБА для офисных помещений по СП 51.13330.2011 [24]. В соответствии с Методикой СОУТ (приказ Минтруда России № 817н) при отсутствии превышения гигиенических нормативов по шуму фактор «шум» относит условия труда к 2 классу (допустимые условия труда).

#### **7.4.5 Оценка факторов условий труда и реализуемые мероприятия по их улучшению**

По результатам специальной оценки условий труда, выполненной по Методике СОУТ и Классификатору вредных и (или) опасных производственных факторов, утверждённым приказом Минтруда России от

21.11.2023 № 817н, для рабочего места инженера установлены следующие классы условий труда по отдельным факторам:

- Микроклимат рабочей зоны – по параметрам температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха (приложение 5 Методики) фактические значения в холодный и тёплый периоды находятся в пределах оптимальных диапазонов для категории работ Ia; фактор отнесён к 1 классу (оптимальные условия труда);
- Уровень шума на рабочем месте – по приложению 6 Методики и СанПиН 1.2.3685-21 эквивалентный уровень звука на рабочем месте составляет 45 дБА, что существенно ниже предельно допустимого уровня 80 дБА и не превышает норматив 50 дБА для офисных помещений; фактор отнесён к 2 классу (допустимые условия труда);
- Освещённость рабочей поверхности – по приложению 7 Методики СОУТ при нормируемой освещённости не менее 500 лк фактические значения достигаются за счёт совмещённого естественного и искусственного освещения; фактор оценивается в пределах 1–2 классов (нормируемая освещённость соблюдается);
- Эргономические параметры рабочего места и тяжесть трудового процесса – по показателям раздела 4 Классификатора (масса поднимаемых грузов, стереотипные движения, статическая нагрузка, рабочая поза, наклоны корпуса, перемещения) значения не выходят за диапазоны 1 класса; фактор «тяжесть трудового процесса» отнесён к 1 классу;
- Напряжённость трудового процесса – по показателям раздела 5 Классификатора и приложению 14 Методики (плотность сигналов, длительность работы за видеотерминалом и др.) часть показателей находится в диапазоне вредного подкласса 3.1, в результате фактор «напряжённость трудового процесса» отнесён к подклассу 3.1 (вредные условия труда 1 степени);

С учётом того, что итоговый класс по Методике СОУТ определяется по наиболее неблагоприятному фактору, при оптимальном микроклимате, допустимых уровнях шума, освещённости и тяжести труда общие условия труда инженера характеризуются как вредные, подкласс 3.1 по фактору «напряжённость трудового процесса».

В связи с этим на рабочем месте реализуются следующие мероприятия по поддержанию и улучшению условий труда:

- по микроклимату (фактор класса 1): поддержание температуры, влажности и скорости движения воздуха в пределах, установленных СП 2.2.3670-20 [1] и ГОСТ 12.1.005-88 [14], за счёт работы системы вентиляции и (при необходимости) кондиционирования;
- по шуму (фактор класса 2): применение малошумных системных блоков и периферийного оборудования, контроль уровней шума по ГОСТ 12.1.003-2014 [15], размещение техники так, чтобы минимизировать воздействие на рабочих местах;

Для снижения напряжённости трудового процесса (вредный подкласс 3.1) выполняются специальные организационные мероприятия: регламентированные перерывы не реже одного раза в час, краткий отдых с изменением позы и выполнением упражнений для глаз и кистей рук, чередование задач различной сложности, обучение рациональным приёмам работы с ПЭВМ.

Таким образом, по данным СОУТ по приказу Минтруда России № 817н [28] большинство факторов условий труда на рабочем месте инженера поддерживаются на уровнях 1–2 классов, а для фактора «напряжённость трудового процесса» подкласса 3.1 реализуются мероприятия, направленные на снижение его воздействия.

## **7.5 Оценка по эргономике рабочего места**

Оценка эргономики рабочего места выполнена в соответствии с ГОСТ Р 50923–96 «Оборудование офисов. Рабочее место оператора персонального компьютера. Общие эргономические требования и требования безопасности» [20] и общими требованиями к рабочему месту при выполнении работ сидя ГОСТ 12.2.032–78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» [19]. Параметры стола, кресла и размещение оборудования обеспечивают работу сидя в зоне удобной досягаемости и поддержание рациональной рабочей позы.

Рабочий стол: высота 730 мм, ширина 1400 мм, глубина 800 мм. Под столом предусмотрено пространство для ног: высота не менее 600 мм, ширина 1000 мм, глубина на уровне колен 500 мм, на уровне вытянутых ног 700 мм. Это позволяет сохранять устойчивую рабочую позу, свободно менять положение ног и не ограничивает движения оператора.

Кресло: ширина и глубина сиденья около 420 мм, передний край закруглён. Высота сиденья регулируется в диапазоне 400–520 мм. Спинка высотой около 300 мм с регулировкой наклона поддерживает поясничный отдел. Конструкция кресла обеспечивает углы в коленных и локтевых суставах, близкие к  $90^\circ$ , стопы опираются на пол или подставку, что соответствует требованиям эргономики для продолжительной работы с ПЭВМ.

Поверхность стола матовая, исключающая блики. Монитор установлен так, чтобы свет из окна не попадал непосредственно на экран. Овещённость рабочей зоны поддерживается в пределах 300–500 лк в соответствии с СП

52.13330.2016 «Свод правил. Естественное и искусственное освещение» [23] для рабочих мест с ПЭВМ.

В таблицах 7.5 и 7.6 представлено сравнение физических и требуемых значений. Нормативные значения размеров рабочего стола и пространства для ног приняты по ГОСТ Р 50923–96 (пп. 4.2.2–4.2.4) [20].

Таблица 7.5 – Фактические параметры эргономики рабочего стола

Параметр	Фактическое значение, мм	Требуемое значение по ГОСТ Р 50923–96, мм
Высота рабочей поверхности	730	680 – 800
Глубина стола	800	$\geq 600$
Ширина стола	1400	$\geq 1200$
Высота пространства для ног	600	$\geq 600$
Глубина на уровне колен	500	$\geq 450$
Глубина на уровне вытянутых ног	700	$\geq 650$

Таблица 7.6 – Фактические параметры эргономики рабочего кресла

Параметр	Фактическое значение, мм	Требуемое значение по ГОСТ Р 50923–96, мм
Глубина	420	$\geq 400$
Ширина	420	$\geq 400$
Длина подлокотников	310	$\geq 250$
Ширина подлокотников	60	50 – 70
Высота	410 – 550	400 – 550
Высота опорной поверхности спинки	300	300

При указанных параметрах рабочее место соответствует требованиям эргономики и санитарных норм для работы с ПЭВМ и снижает зрительное напряжение.

Рабочее место инженера оснащено стандартной клавиатурой и компьютерной мышью, размещенными отдельно от монитора и системного блока. Такое раздельное размещение позволяет настроить положение устройств с учетом антропометрических особенностей пользователя.

На рабочем месте установлены персональные компьютеры с жидкокристаллическими мониторами диагональю 23–24 дюйма. Оценка параметров монитора выполнена по ГОСТ Р 52324-2005 «Эргономические требования к работе с визуальными дисплейными терминалами, основанными на плоских панелях» [21]. В таблице 7.7 приведено сопоставление фактических характеристик с требованиями стандарта по яркости, контрасту, однородности яркости, времени формирования изображения и временной нестабильности.

Таблица 7.7 – Фактические показатели эргономики монитора

Параметр	Фактическое значение	Требование ГОСТ Р 52324-2005	Соответствие
Тип дисплея	ЖК-панель с матовой поверхностью	Стандарт распространяется на экраны ВДТ с плоскими панелями, используемыми для офисных задач	Требование выполняется
Проектная освещённость экрана Es	300 лк	Для эмиссионных дисплеев проектная освещённость должна быть в диапазоне 250–750 лк	Соответствует
Яркость белого поля	250 кд/м <sup>2</sup>	Яркость высокого уровня L_ES,HS должна удовлетворять неравенству с минимальным значением порядка 20 кд/м <sup>2</sup> (формулы (18), (56) пп. 7.14, 8.7.14)	Значительно выше минимума, требование выполняется

## Продолжение таблицы 7.7

Контраст	1000:1	Контрастная модуляция должна удовлетворять неравенству (22) п. 7.15 и эквивалентным формулам (57) п. 8.7.15; для соседних уровняй кодирования яркости отношение «высший/низший уровень» должно быть $> 1,5$	Фактическое значение существенно выше требуемого
Однородность яркости по полю экрана	Неравномерность $\leq 10 \%$	Для однородности яркости отношение максимальной яркости к минимальной не должно превышать 1,3–1,7 в зависимости от углового разнесения объектов (табл. 14, п. 7.19; табл. 68, п. 8.7.19)	$1,1 < 1,3$ , требование выполняется с запасом
Время формирования изображения	4 мс	Время формирования изображения для дисплеев с плоскими панелями должно быть $< 55$ мс (п. 7.21 и 8.7.23)	$4 \text{ мс} < 55 \text{ мс}$ , требование выполняется
Временная нестабильность (мелькание)	Мерцание не наблюдается, коэффициент пульсации подсветки $\leq 5 \%$	Изображение должно быть свободно от мелькания как минимум для 90 % пользователей (п. 7.24)	По визуальной оценке и низкой пульсации условие выполняется

По всем указанным показателям монитор соответствует требованиям ГОСТ Р 52324-2005 [21].

## 7.6 Классификация помещения по электро и пожароопасности

### 7.6.1 Электроопасность помещения

Классификацию помещений по опасности поражения электрическим током выполняют в соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ, 7-е изд., п. 1.1.13) [26] и требованиями системы стандартов безопасности труда, установленными ГОСТ 12.1.019-2017 «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты» [27].

Согласно ПУЭ помещения делятся на три класса:

- помещения без повышенной опасности;
- помещения с повышенной опасностью;
- особо опасные помещения.

Помещение, в котором размещено рабочее место инженера, относится к классу помещений без повышенной опасности, поскольку:

- относительная влажность воздуха не превышает 60–70 %, отсутствие конденсата на стенах и оборудовании;
- температура воздуха находится вблизи нормативной (около 22 °C), отсутствуют участки с температурой выше 35 °C;
- полы имеют диэлектрическое покрытие, не являются токопроводящими;
- отсутствует токопроводящая пыль и химически активная среда;
- электрооборудование эксплуатируется в нормальном режиме с исправной изоляцией.

Все розетки имеют защитный контакт РЕ, корпуса системных блоков и источника бесперебойного питания присоединены к защитному проводнику в соответствии с ГОСТ 12.1.030-81 «Электробезопасность. Защитное заземление и зануление» [18], что обеспечивает требуемый уровень защиты при косвенном прикосновении.

## **7.6.2 Пожароопасность помещения**

Классификацию помещения по взрывопожарной и пожарной опасности выполняют в соответствии с Федеральным законом № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (ст. 27) [30] и СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» [25].

В помещении отсутствуют горючие газы, легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, не используются пожаровзрывоопасные технологические процессы. Пожарную нагрузку формируют преимущественно:

- бумага и документация;
- деревянная и полимерная офисная мебель;
- полимерные корпуса компьютерной техники и кабельная продукция.

Для обоснования категории по пожарной опасности ориентировочно оцениваем удельную пожарную нагрузку по приложению Б СП 12.13130.2009. Предположим суммарную массу твёрдых горючих материалов порядка 100 кг (бумага, мебель, пластиковые элементы). При средней низшей теплоте сгорания 15 МДж/кг потенциальная пожарная нагрузка составит:

$$Q = 100 \text{ кг} + 15 \text{ МДж/кг} = 1500 \text{ МДж}$$

Площадь помещения 24 м<sup>2</sup>, тогда удельная пожарная нагрузка:

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{1500}{24} = 63 \text{ МДж/м}^2$$

Полученное значение лежит в диапазоне 1–180 МДж/м<sup>2</sup>. Согласно приложению Б СП 12.13130.2009 помещения, в которых обращаются только твёрдые горючие и трудногорючие материалы и удельная пожарная нагрузка находится в пределах 1–180 МДж/м<sup>2</sup>, относятся к категории В4 по

взрывопожарной и пожарной опасности. Таким образом, рассматриваемое офисное помещение обоснованно относят к категории В4.

По функциональному назначению объект является офисным помещением для проведения расчётных и проектных работ. В соответствии со ст. 32 Федерального закона № 123-ФЗ [30] такие помещения относятся к классу функциональной пожарной опасности Ф4.3 (здания органов управления, проектно-конструкторских организаций,офисы).

### **7.6.3 Оценка электроопасности рабочего помещения**

Эксплуатация персональных компьютеров, источника бесперебойного питания и сетевого оборудования осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Обеспечение электробезопасности работников регламентируется ГОСТ 12.1.019-2017 [17] и ГОСТ Р 12.1.038-2024 «Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» [22], а также требованиями ПУЭ.

В соответствии с ПУЭ и ГОСТ Р 12.1.038-2024 [22] в электроустановках до 1000 В защита при косвенном прикосновении должна обеспечивать, чтобы напряжение прикосновения в нормальном режиме и при единичных повреждениях изоляции не превышало безопасного уровня 50 В переменного тока частотой 50 Гц, а значения токов, проходящих через тело человека, оставались ниже предельно допустимых для заданной длительности воздействия (ориентировочные значения приведены в таблице 8).

В помещении реализованы следующие меры электробезопасности:

- разделение электропроводки на силовую и осветительную линии с применением автоматических выключателей;
- использование защитных заземляющих проводников и розеток с контактом РЕ в системе TN-S (или TN-C-S);

- подключение компьютерной техники через сетевой фильтр и источник бесперебойного питания, обеспечивающие защиту от импульсных перенапряжений и кратковременных провалов напряжения;
- частичное питание периферийного оборудования (маршрутизатор и др.) от внешних низковольтных блоков питания класса II с двойной изоляцией, что снижает риск поражения электрическим током.

В совокупности перечисленные меры обеспечивают выполнение требований ГОСТ 12.1.019-2017 [17] и ГОСТ 12.1.030-81 [18] к защите от прямого и косвенного прикосновения и соответствие помещения классу «без повышенной опасности».

#### **7.6.4 Оценка пожароопасности рабочего помещения**

Пожарная безопасность рабочего помещения обеспечивается в соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования» [16], Федеральным законом № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» [29], Федеральным законом № 123-ФЗ и СП 12.13130.2009 [30].

К основным возможным причинам возгорания относят:

- повреждение изоляции электропроводки и короткие замыкания;
- перегрев элементов блоков питания и сетевого оборудования;
- оставленную включённую технику при отсутствии персонала;
- нарушение правил эксплуатации удлинителей и сетевых фильтров.

Для снижения пожарного риска предусмотрены следующие меры:

- применение скрытой электропроводки в негорючих строительных конструкциях, защитных автоматических выключателей и устройств защитного отключения;

- наличие на этаже углекислотного огнетушителя типа ОУ-3 (или аналогичного), пригодного для тушения электроустановок напряжением до 1000 В;
- размещение на путях эвакуации схемы эвакуации и указателей направления движения;
- поддержание свободного доступа к выходам и первичным средствам пожаротушения;
- регламент отключения компьютерной и оргтехники по окончании рабочего дня.

С учётом класса функциональной пожарной опасности Ф4.3, категории помещения по пожарной опасности В4 и реализованных инженерно-технических и организационных мероприятий помещение обеспечивает требуемый уровень пожарной и электробезопасности в соответствии с действующими нормативными документами.

## **7.7 Расчёт и оценка освещения рабочего места инженера**

Освещение рабочего места должно обеспечивать достаточную разборчивость информации на экране и документах и предотвращать избыточное зрительное напряжение. Недостаточная освещённость усиливает нагрузку на зрительный анализатор, а избыточная яркость и блики вызывают дискомфорт и утомление.

Обратимся к СП 52.13330.2016 [23] «Естественное и искусственное освещение». Для рабочих мест с ПЭВМ, где выполняются вычисления, программирование и работа с текстовой и графической документацией, нормируемая освещённость на рабочей поверхности принимается не менее 500 лк. Освещение в помещении организовано как комбинированное: используется естественный боковой свет от окна и общее искусственное освещение, обеспечивающее требуемый уровень освещённости на рабочем

столе согласно СП 52.13330.2016 [23]. Выполним вычисления на основе методического пособия Беков Б. Е., Бобков Н. И. Производственное освещение авиастроительных предприятий: Методические указания к разделу «Охрана труда» [32].

### **7.7.1 Расчет естественного освещения графо-аналитическим методом**

В помещении применяется совмещённое освещение. Согласно методичке, естественное освещение оценивают по коэффициенту естественной освещённости (КЕО) в неблагоприятной точке рабочей зоны.

Для бокового освещения КЕО рассчитывают по формуле, учитывающей геометрические характеристики световых проёмов, отражённый свет от внутренних поверхностей и светопропускание остекления. В целях расчета лежит проверка выполнения нормируемого значения  $e_n$  для помещений офисно-административного назначения.

Определение исходных значений:

- Размеры помещения:  $6 \times 4$  м, площадь  $24 \text{ м}^2$
- Высота помещения: 2,7 м
- Высота рабочей плоскости: 0,8 м
- Окна: 3 шт., размеры  $1,20 \times 1,50$  м, расположены на двух смежных стенах (угловое боковое освещение)
- Высота подоконника: 0,90 м
- Высота верха окна: 2,40 м
- Превышение верха окна над рабочей плоскостью:

$$h_B = 2,40 - 0,80 = 1,60 \text{ м}$$

- Внешние затенения: отсутствуют

- Остекление: двухкамерный стеклопакет – суммарное светопропускание:  $\tau=0,50$
- Светлые внутренние поверхности:  $r_1 = 1,20$
- Коэффициент запаса по естественному освещению:  $K_3 = 1,2$
- Нормируемый КЕО для офисного помещения:  $e_n = 1,5\%$

Определение геометрического КЕО:

Геометрический коэффициент естественной освещённости отражает ту часть светового потока от небосвода, которая может попасть в расчётную точку через световые проёмы без учёта отражений и светопропускания остекления.

Расчёт геометрического КЕО выполняется графо-аналитическим методом в соответствии с СП 52.13330.2016 [23]. Для этого график I накладывается на чертёж поперечного разреза помещения так, чтобы центр графика совпадал с расчётной точкой на рабочей плоскости, а нижняя линия графика – со следом рабочей поверхности. Подсчитывается число лучей  $n_1$  проходящих через световые проёмы по высоте. Аналогично график II накладывается на план помещения с совмещением центра графика с проекцией расчётной точки; по нему определяется число лучей  $n_2$ , проходящих через световые проёмы по ширине.

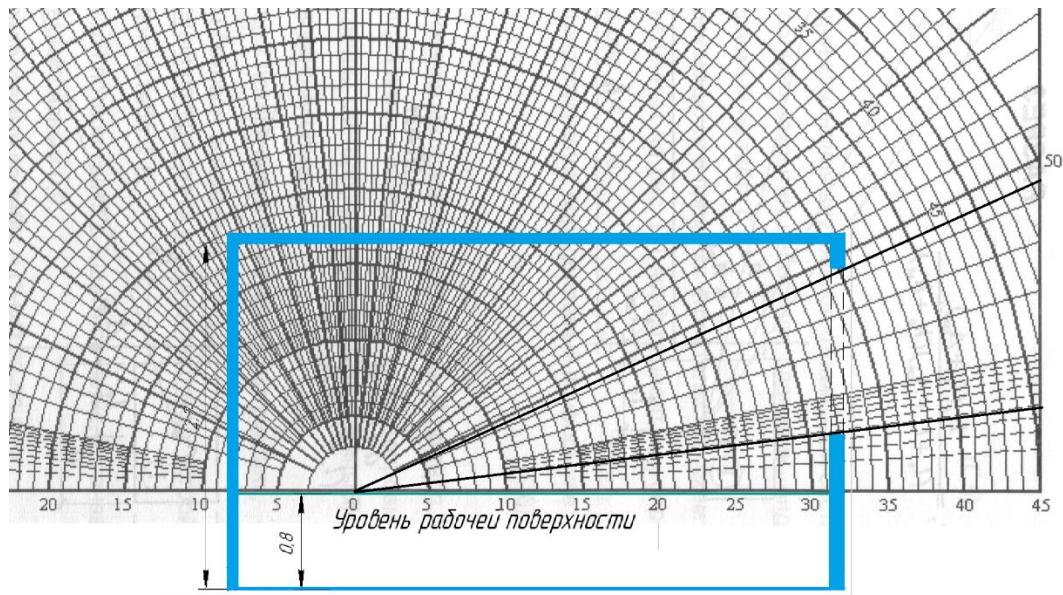


Рисунок 7.1 - Определение числа лучей  $n_1$  по графику I

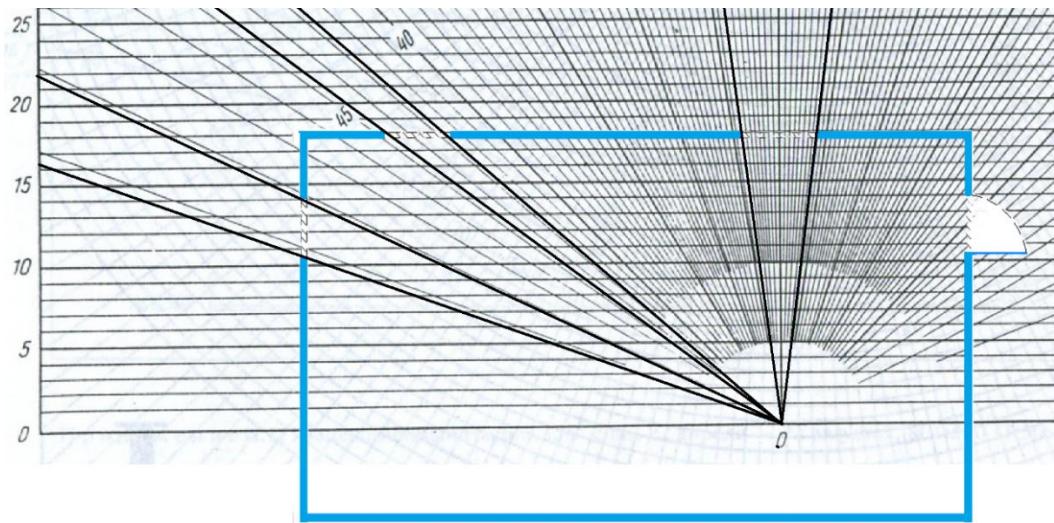


Рисунок 7.2 - Определение числа лучей  $n_2$  по графику II

В рассматриваемом помещении по рисунку 7.1 через окна проходит  $n_1=10$  лучей, по рисунку 7.2  $n_2 = 20$  лучей. Тогда геометрический коэффициент естественной освещённости от небосвода в расчётной точке равен

$$\varepsilon_{6,д} = 0,01 * n_1 * n_2 = 0,01 * 10 * 20 = 2,0\%$$

Вклад от застройки:

Противоположных зданий нет, поэтому примем значения:

$$\varepsilon_{3,d} = 0, R = 0$$

Итоговый расчёт КЕО:

При боковом освещении коэффициент естественной освещённости определяется по выражению:

$$e_p^6 = (\varepsilon_{6,d} + \varepsilon_{3,d} * R) * r1 * \tau / K_3$$

где:

$\varepsilon_{6,d}$  - геометрический КЕО от небосвода;

$\varepsilon_{3,d}$  - вклад от противоположной застройки;

$\tau$  - коэффициент светопропускания окон;

$R$  - коэффициент относительной яркости застройки;

$r1$  - коэффициент светопропускания окон;

$K_3$  - коэффициент запаса.

$$e_p^6 = (2,0 + 0) * 1,20 * 0,50 / 1 = 1,0\%$$

Сопоставление с нормируемым значением:

$$e_p^6 = 1,0\% \geq e_n = 1,50\%$$

Таким образом, естественное боковое освещение в расчётной точке не обеспечивает требуемого по нормам уровня освещённости: коэффициент естественной освещённости ниже нормируемого. Для создания нормативных условий зрительной работы в помещении необходимо использовать совмещённое освещение – дополнять естественное освещение системой общего искусственного освещения.

В соответствии с п. 5.2 методических указаний расчёт естественного освещения по упрощённому методу включает проверку достаточности площади световых проёмов. По рис. 3 и табл. 3 приложения 2 для помещения с боковым естественным освещением глубиной  $A=4$  м и нормируемым значением КЕО  $e_h=1,5\%$  требуемое отношение площади световых проёмов к площади пола принимаем  $\varphi_{tp} = 20\%$ . Тогда необходимая суммарная площадь окон составляет

$$S_{ok, tp} = \frac{\varphi_{tp}}{100} S = 0,20 * 24 = 4,8 \text{ м}^2$$

Фактическая площадь трёх окон равна

$$S_{ok,\phi} = 3 * 1,20 * 1,50 = 5,4 \text{ м}^2$$

что соответствует относительной площади  $\varphi_\phi = \frac{S_{ok,\phi}}{S} * 100\% = \frac{5,4}{24} * 100\% = 22,5\%$ . Поскольку  $\varphi_\phi \geq \varphi_{tp}$ , существующие световые проёмы удовлетворяют требованиям упрощённого метода расчёта и обеспечивают необходимый уровень естественного освещения по площади световой поверхности.

### **7.7.2 Расчет искусственного освещения рабочего помещения**

Расчёт будет выполняться по методическим указаниям. На первом этапе необходимо выбрать тип и количество светильников, а также определить их расположение таким образом, чтобы обеспечить требуемый уровень освещённости при минимальных затратах на установку и эксплуатацию.

Выбор типа источников света:

С учётом современных требований к энергоэффективности и качеству световой среды для освещения рабочего кабинета выбираем светодиодные (LED) источники света. Для данного помещения принимаем светодиодные светильники с нейтрально-белым светом (коррелированная цветовая

температура около 4000 К) и индексом цветопередачи не ниже  $R_a \geq 80$ , что обеспечивает комфортные условия зрительной работы при работе с ПЭВМ и документацией.

#### Выбор системы освещения:

Выбирается система общего освещения, так как помещение имеет два рабочих места без необходимости локальной подсветки; при работах средней точности (III–IV разряд). Нормы проектирования» и методичке достаточно общего освещения, обеспечивающего требуемую равномерность и комфорт.

#### Выбор типа светильника:

В качестве светильников принимаем офисные светодиодные светильники панельного типа с матовым рассеивателем, предназначенные для установки в подвесной потолок или накладного монтажа. Класс светораспределения П (прямого света) и кривой силы света типа Д (косинусная) по ГОСТ 17677-82 «Светильники. Общие технические условия», так как такая комбинация обеспечивает эффективное использование светового потока

Определение количества светильников и схемы их расположения в производственном помещении:

Выберем 4 светильника, расположенных в 2 ряда по 2 вдоль длины помещения:

Определение нормированного значения освещенности на рабочем месте:

Принимаем  $E_n = 300$  лк на рабочей плоскости ( $h = 0,8$  м), так как помещение используется как рабочий кабинет с ПК и документацией.

Определение нормированного значения освещенности на рабочем месте и расчет освещенности методом коэффициента использования:

Применяем метод коэффициента использования светового потока, так как по методическому пособию он предназначен для расчёта систем общего освещения с люминесцентными светильниками при равномерном освещении горизонтальных рабочих поверхностей в помещениях простой прямоугольной формы.

Входные данные:

- Размеры помещения:  $A = 6 \text{ м}$ ,  $B = 4 \text{ м}$ ,  $S = 24 \text{ м}^2$
- Высота помещения:  $H = 2,7 \text{ м}$
- Нормируемая освещённость:  $E_n = 300 \text{ лк}$
- Коэффициенты отражения:  $\rho_p = 0,7$  (потолок светлый),  $\rho_s = 0,5$  (стены светлые)
- Коэффициент запаса:  $K_n = 1,4$
- Коэффициент неравномерности  $Z = 1,1$

Произведем расчет по формулам из методического пособия:

Индекс помещения:

$$i = \frac{A * B}{(h(A + B))} = \frac{6 * 4}{(1,9 * (6 + 4))} \approx 1,3$$

где  $i$  – индекс помещения,  $A$  и  $B$  – длина и ширина помещения в м,  $h$  – расчетная высота светильника над рабочей поверхностью в м.

$$h = H - h_c - h_p = 2,7 - 0,8 = 1,9 \text{ м}$$

где  $H$  – высота помещения в м,  $h_c$  – расстояние от светильника до потолка,  $h_p$  – высота рабочей поверхности над полом, равная 0,8 м.

Коэффициент использования:

По таблицам для светильников прямого света при  $\rho_{\text{пот}} = 0,7$ ;  $\rho_{cn} = 0,5$

$$\eta = 47\%$$

Требуемый суммарный световой поток:

$$\Phi = \frac{100 * E_H S K_3 Z}{N \eta}$$

$$\Phi = \frac{100 * 300 * 24 * 1.4 * 1.1}{4 * 47} = 5898 \text{ лм}$$

Где  $N$  – количество выбранных светильников

Выбор лампы и проверка:

Берём светильник с 2 светодиодными лампами:

$$\Phi_{\text{лампы}} = 3000 \text{ лм}, \Phi_{\text{св}} = 2 * 3000 = 6000 \text{ лм}$$

Сравнение с расчётным:

$$\frac{6000 - 5898}{5898} \approx 1,7\%$$

Это в допустимом диапазоне отклонений ( $-10\% \dots +20\%$ ) – указанном в методичке, менять число светильников не требуется.

Рассчитаем мощность осветительной установки по формуле:

$$P_{\text{оу}} = P_{\text{л}} * N = 40 * 8 = 320 \text{ Вт}$$

Теперь рассчитаем фактическую освещенность по формуле:

$$E_H = \frac{4 * 5898 * 0.47}{24 * 1.4 * 1.1} = 305 \text{ лк}$$

Выполненный расчёт искусственного освещения показал, что фактическая средняя освещённость на рабочей плоскости  $E_{\Phi} = 305$  лк не

ниже нормируемого значения  $E_H = 300$  лк. В соответствии с Методикой проведения специальной оценки условий труда, утверждённой приказом Минтруда России от 21.11.2023 № 817н, при  $E_\phi \geq E_H$  условия труда по показателю «освещённость рабочей поверхности» относятся к классу 2 (допустимые).

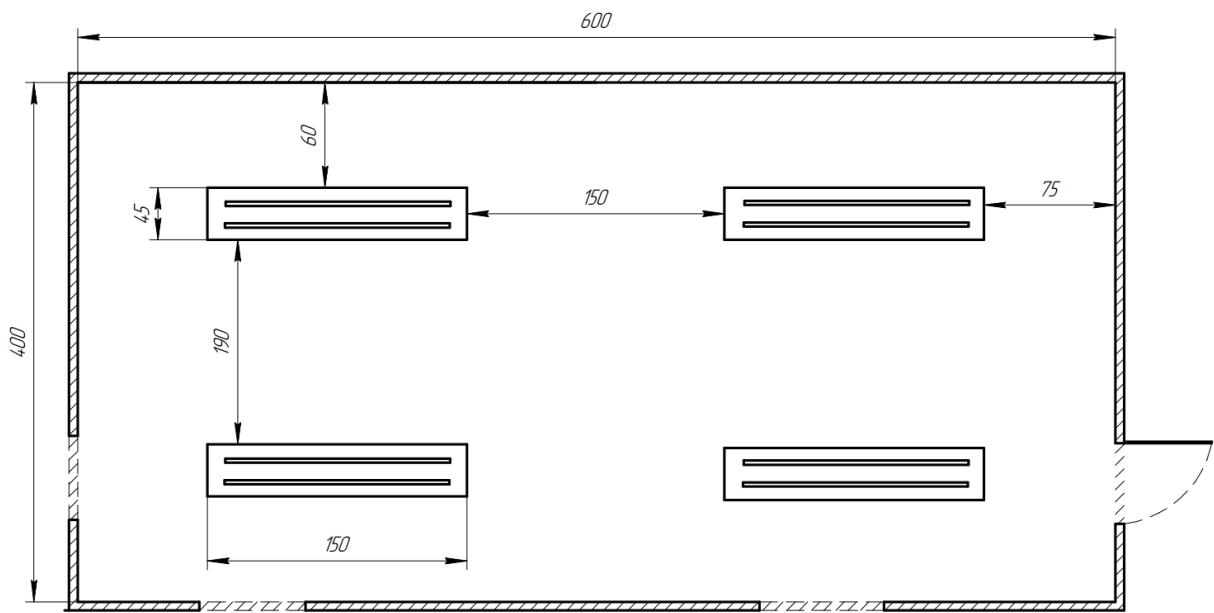


Рисунок 7.3 – Схема размещения светильников (размеры указаны в см)

### 7.7.3 Совмешённое освещение

Расчётом естественного бокового освещения в расчётной точке получен коэффициент естественной освещённости  $e_p^b=1,0\%$ , что ниже нормируемого значения  $e_n=1,5\%$ , то есть одного естественного освещения недостаточно. В ходе расчётов было установлено, что фактическое отношение площади окон к площади пола  $\varphi_\phi \geq \varphi_{tr}$  следовательно, размеры и количество световых проёмов являются достаточными и изменения площади остекления не требуется.

Для компенсации дефицита света используется совмешённое освещение: боковое естественное и общее искусственное освещение четырьмя

светодиодными светильниками. По расчёту методом коэффициента использования фактическая средняя освещённость на рабочей плоскости составляет  $E_\phi = 305$  лк при нормируемой  $E_H = 300$  лк Совмещённое освещение обеспечивает выполнение требований нормативных документов по КЕО и освещённости рабочих мест и может быть признано достаточным. В соответствии с Методикой проведения специальной оценки условий труда (приказ Минтруда России от 21.11.2023 № 817н) условия труда по показателю «освещённость рабочей поверхности» относятся к 2 классу (допустимые), балльный показатель УТ = 0.

### **Вывод по разделу охрана труда и окружающей среды**

В разделе выполнена оценка условий труда инженера-разработчика на рабочем месте с ПЭВМ по факторам микроклимата, шума, освещённости, тяжести и напряжённости трудового процесса в соответствии с Методикой СОУТ (приказ Минтруда России № 817н), СанПиН 1.2.3685-21 и Р 2.2.2006-05. Установлено, что микроклимат, уровень шума и освещённость соответствуют гигиеническим нормативам и относятся к 1–2 классам условий труда. общий класс условий труда на рабочем месте инженера принят как 3.1.

Проведенная оценка рабочего места по эргономическим факторам установила соответствие требованиям ГОСТ 12.2.032-78, ГОСТ Р 50923-96 и ГОСТ Р 52324-2005,

Отдельно оценены электробезопасность и пожарная безопасность рабочего помещения. Помещение отнесено к классу по электроопасности «без повышенной опасности» по ПУЭ и ГОСТ 12.1.019-2017; корпуса оборудования заземлены в соответствии с ГОСТ 12.1.030-81, напряжения прикосновения и токи не превышают предельно допустимые значения ГОСТ Р 12.1.038-2024. По СП 12.13130.2009 и Федеральному закону № 123-ФЗ помещение отнесено к категории В4 по взрывопожарной и пожарной

опасности и к классу функциональной пожарной опасности Ф4.3, требования пожарной безопасности выполняются.

В рамках раздела освещённости выполнен расчёт совмещённого освещения рабочего помещения инженера в соответствии с требованиями СНиП II-4-79 (актуализированная редакция СП 52.13330), и Методики СОУТ по приказу Минтруда России № 817н. Показано, что при недостаточном уровне естественного освещения в расчётной точке применение системы общего светодиодного освещения обеспечивает фактическую освещённость рабочей поверхности, а условия труда по показателю «освещённость рабочей поверхности» относятся к 2 классу с балльной оценкой УТ = 0.

## 8 Технологическая часть

### 8.1 Анализ исходных данных

В рамках выполнения технологической части дипломного проектирования требуется разработать конструкцию и технологию сборки электронного коммутатора сигналов (Приложение Г), а также спецификацию элементов (Приложение Д). Для этого проводится анализ исходных данных, включающих электрическую принципиальную схему, перечень элементов и требования задания.

Полученные сведения позволяют определить назначение изделия, условия его работы и факторы, влияющие на выбор конструктивно-технологических решений, что служит основой для последующей разработки конструкции функциональной ячейки и параметров печатной платы.

На рисунке 8.1 представлена принципиальная схема устройства.

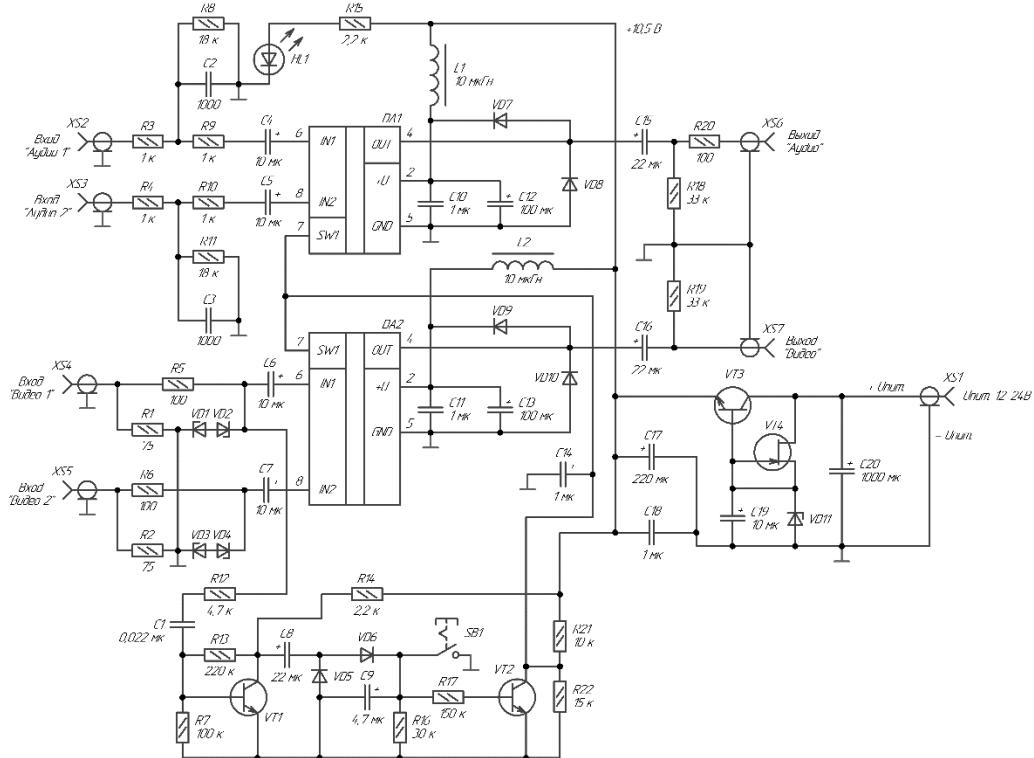


Рисунок 8.1 - Принципиальная схема устройства

Принципиальная схема устройства изображена на рисунке 8.1. Устройство представляет собой электронный коммутатор сигналов, имеющий по два видео- и аудиовхода. Его выходы подключают соответственно к композитному видеовходу телевизора (монитора) и аудиовходу, но можно и к разъёму SCART через переходник. Устройство построено на интегральных микросхемах NJM2233BS с двумя входами, выборочно коммутируемыми на один выход. Максимальная рабочая частота микросхем достигает 10 МГц. На микросхеме DA1 собран коммутатор аудиосигналов. Когда на её управляющем входе SW1 присутствует низкий уровень напряжения, на выход OUT микросхемы проходит сигнал, поступающий через вход “Аудио 1” на её вход IN1. При высоком уровне на входе SW1 управляющего напряжения на выход коммутатора пройдёт сигнал с входа “Аудио 2”. Конденсаторы C2 и C3 препятствуют проникновению на оба входа микросхемы радиочастот, в том числе видеосигналов при ошибочной их подаче на аудиовходы коммутатора.

Аналогично работает и коммутатор видеосигналов, реализованный на микросхеме DA2. Видеосигнал “Видео 1” проходит на выход при низком уровне напряжения на управляющем входе, а видеосигнал “Видео 2” — при высоком. Следует иметь в виду, что в случае отсутствия видеосигнала “Видео 1” высокий уровень на управляющем входе присутствует всегда. Подробнее об этом будет рассказано дальше.

Резисторы R1 и R2 обеспечивают согласование входного сопротивления коммутатора с выходным сопротивлением источников видеосигналов. Стабилитроны VD1–VD4 и диоды VD7–VD10 защищают входы и выходы микросхем от импульсов высокого напряжения, которые могут возникать при подключении сигнальных кабелей к работающим от сети переменного тока устройствам.

Подаваемые пары (аудио- и видео-) сигналов могут переключаться автоматически. Если видеосигнал поступает только на вход “Видео 2”, то оба

коммутатора пропускают на выходы сигналы, приходящие на входы IN2 микросхем DA1 и DA2.

Переключением коммутаторов управляет узел, собранный на транзисторах VT1 и VT2. Приходящий на вход “Видео 1” видеосигнал через цепь R12C1 проходит на базу транзистора VT1, усиливается и через разделительный конденсатор C8 поступает на выпрямитель, выполненный на диодах VD5 и VD6. Пульсации выпрямленного напряжения сглаживаются конденсатором C9. Постоянное напряжение с него выделяется через резистор R17 на эмиттерный переход транзистора VT2, открывая его. Напряжение между коллектором и эмиттером транзистора VT2 и, следовательно, напряжение на выводах 7 микросхем DA1 и DA2 становится близким к нулю. В результате обе микросхемы переключаются на коммутацию сигналов, поступающих на их входы IN1.

Следовательно, вход “Видео 1” имеет приоритет перед входом “Видео 2”. Если же при наличии видеосигнала на входе “Видео 1” требуется переключить устройство на коммутацию сигналов со вторых входов, можно воспользоваться кнопкой SB1 с фиксацией. При замыкании её контактов на выходы коммутатора будут проходить сигналы с его вторых входов.

При такой логике работы автоматического коммутатора к его вторым входам желательно подключать наиболее часто используемый источник сигналов, например проигрыватель DVD, а к первым входам подсоединять реже используемый аппарат, который будет иметь приоритет, например игровую видеоприставку.

Узлы коммутатора питаются от параметрического стабилизатора, собранного на транзисторах VT3 и VT4. Полевой транзистор VT4 работает в качестве источника стабильного тока для стабилитрона VD11. Диод VD12 защищает устройство от неправильного подключения напряжения питания. Если в готовом коммутаторе такая ситуация исключена, диод можно не

устанавливать. Хотя напряжение питания микросхем может быть от 5 до 13 В, для них выбрано значение 10,5 В. Это связано с тем, что при напряжении менее 9 В может наблюдаться ухудшение качества синхронизации в старых отечественных телевизорах, в которых устройство синхронизации развёртки собрано на микросхеме K174XA11.

Обе микросхемы устройства питаются стабильным напряжением через фильтры L1C10C12 и L2C11C13, что предотвращает появление муара и других подобных дефектов на изображении. Светодиод HL1 сигнализирует о наличии напряжения питания. Устройство потребляет ток 30 мА при напряжении питания 12 В.

## **8.2 Разработка конструкции изделия**

### **8.2.1 Анализ элементной базы**

В данном разделе выполнен анализ элементной базы электронного коммутатора сигналов, установленной на печатной плате функциональной ячейки. В таблице 1.1 приведены основные параметры компонентов электрической схемы (масса, установочная площадь, количество выводов и диапазон рабочих температур), необходимые для расчёта конструктивно-технологических характеристик устройства [34,35].

Таблица 8.1 – Результаты анализа элементарной базы

Позиционное обозначение	Кол-во	Наименование (корпус)	Масса одного элемента, г	Масса всех элементов, г	Площадь одного элемента, мм	Установочная площадь всех элементов, мм	Выводы	Рабочая температура
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Конденсаторы								
C1	1	Чип-конденсатор керамический 0,022 мкФ, ±10%, 50 В, 1206	0,027	0,027	5,1	5,1	2	-55...+125 °C

Позиционное обозначение		Кол-во	Наименование (корпус)	Масса одного элемента, г	Масса всех элементов, г	Площадь одного элемента, мм	Установочная площадь всех элементов, мм	Выводы	Рабочая температура
C2, C3	2	Чип-конденсатор керамический 1000 пФ, ±10%, 50 В, 1206	0,027	0,054	5,1	10,2	4	-55...+125 °C	
C4, C5, C6, C7	4	Конденсатор электролитический 10 мкФ, ±10%, 10 В	0,41	1,64	19,6	78,4	8	-40...+105 °C	
C8, C15, C16	3	Конденсатор электролитический 22 мкФ, ±20%, 10 В	0,41	1,23	19,6	58,8	6	-40...+105 °C	
C9	1	Конденсатор электролитический 4,7 мкФ, ±20%, 10 В	0,41	0,41	19,6	19,6	2	-40...+105 °C	
C10, C11, C18	3	Чип-конденсатор керамический 1 мкФ, ±10%, 50 В, 1206	0,027	0,081	5,1	15,4	6	-55...+125 °C	
C12, C13	2	Конденсатор электролитический 100 мкФ, ±20%, 16 В	0,41	0,82	19,6	39,2	4	-40...+105 °C	
C14	1	Конденсатор электролитический 1 мкФ, ±20%, 10 В	0,41	0,41	19,6	19,6	2	-40...+105 °C	
C17	1	Конденсатор электролитический 220 мкФ, ±20%, 16 В	0,41	0,41	19,6	19,6	2	-40...+105 °C	
C19	1	Конденсатор электролитический 10 мкФ, ±20%, 16 В	0,41	0,41	19,6	19,6	2	-40...+105 °C	
C20	1	Конденсатор электролитический 1000 мкФ, ±20%, 25 В	0,41	0,41	19,6	19,6	2	-40...+105 °C	
Резисторы									
R1, R2	2	Чип-резистор 75 Ом, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,012	2,5	5	4	-55...+155 °C	
R3, R4, R9, R10	4	Чип-резистор 1 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,024	2,5	10	8	-55...+155 °C	

Позиционное обозначение		Кол-во	Наименование (корпус)	Масса одного элемента, г	Масса всех элементов, г	Площадь одного элемента, мм	Установочная площадь всех элементов, мм	Выводы	Рабочая температура
R5, R6, R20	3	Чип-резистор 100 Ом, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,018	2,5	7,5	6	-55...+155 °C	
R7	1	Чип-резистор 100 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,006	2,5	2,5	2	-55...+155 °C	
R8, R11	2	Чип-резистор 18 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,012	2,5	5	4	-55...+155 °C	
R12	1	Чип-резистор 4,7 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,006	2,5	2,5	2	-55...+155 °C	
R13	1	Чип-резистор 220 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,006	2,5	2,5	2	-55...+155 °C	
R14, R15	2	Чип-резистор 2,2 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,012	2,5	5	4	-55...+155 °C	
R16	1	Чип-резистор 30 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,006	2,5	2,5	2	-55...+155 °C	
R17	1	Чип-резистор 150 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,006	2,5	2,5	2	-55...+155 °C	
R18, R19	2	Чип-резистор 33 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,012	2,5	5	4	-55...+155 °C	
R21	1	Чип-резистор 10 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,006	2,5	2,5	2	-55...+155 °C	
R22	1	Чип-резистор 15 кОм, ±1%, 0,125 Вт, 0805	0,006	0,006	2,5	2,5	2	-55...+155 °C	
Соединители									
XS1	1	Розетка DS-201-PBT-SL	1	1	140	140	2	-25...+70 °C	
XS2 - XS7	6	Розетка RS-105A	3	18	130	780	18	-25...+70 °C	
Транзисторы									
VT1 - VT3	3	Транзистор биполярный NPN-типа KT660A аАО.336.669 ТУ	0,30	0,90	25	75	9	-60...+125 °C	

Позиционное обозначение		Кол-во	Наименование (корпус)	Масса одного элемента, г	Масса всех элементов, г	Площадь одного элемента, мм	Установочная площадь всех элементов, мм	Выводы	Рабочая температура
VT4	1	Полевой транзистор с PN-переходом с n-каналом MMBF4391L		0,01	0,01	4	4	3	-55...+150 °C
Диоды выпрямительные									
VD5, VD6	2	Диод выпрямительный STPS3L60S		0,25	0,5	50	100	4	-55...+150 °C
VD7 - VD10	4	Защитный диод P6KE39A		0,40	1,6	20	80	8	-55...+150 °C
Светодиоды									
HL1	1	Светодиод GNL-3012GD, Ø 3 мм, зеленый		0,20	0,20	7	7	2	-40...+85 °C
Стабилизаторы напряжения									
VD1 - VD4, VD11	5	Стабилитрон 1N4758A		0,35	1,75	12	60	10	-55...+150 °C
Интегральные микросхемы									
DA1, DA2	2	Микросхема интегральная NJM2233BS		2,3	4,6	60	120	16	-25...+70 °C
L1, L2	2	Катушка индуктивности 10 мкГн, ±20%		1	2	36	72	4	-25...+70 °C
Коммутационные элементы									
SB1	1	Кнопка PB22E07 с фиксацией		15	15	380	380	2	-25...+70 °C
<b>Итого:</b>	<b>70</b>			<b>51,6</b>			<b>2178,1</b>	<b>162</b>	

По результатам анализа данных таблицы 8.1. определены:

- суммарная масса радиокомпонентов, установленных на плате  $m = 51,6 \text{ г}$ ;

- суммарная установочная площадь расположенных на плате  $S_{\text{эл}} = 2178,1 \text{ мм}^2$ ; радиокомпонентов,
- количество радиоэлементов  $K_i = 70$  шт.;
- количество выводов  $N_{\text{выв}} = 162$  шт.

Наименьшая максимальная температурная устойчивость составляет  $+70^\circ\text{C}$ . Полученные значения будут использованы для оценочных расчетов массогабаритных характеристик изделия.

Анализ показал, что выбранная элементная база обеспечивает требуемые электрические и климатические параметры при приемлемых массогабаритных показателях и плотности монтажа. Разнообразие корпусов и габаритов ЭРЭ определяет требования к компоновке, конструкции печатной платы и способу её сборки, что учитывается в последующих разделах технологической части.

## **8.2.2 Разработка конструкции функциональной ячейки**

### **8.2.2.1 Выбор материала печатной платы**

В качестве материала основания печатной платы принимается стеклотекстолит на эпоксидной смоле типа FR-4, широко применяемый в аппаратуре общего и специального назначения. Выбор данного материала обусловлен тем, что он обеспечивает требуемое сочетание электрических, тепловых и механических характеристик при изготовлении двусторонних печатных плат с металлизированными отверстиями.

Для него известны следующие характеристики: теплопроводность  $\lambda = 0,3 \text{ Вт}/\text{м} * \text{К}$ , плотность  $\rho = 1,85 \text{ г}/\text{см}^3$ , диапазон рабочих температур от  $-60$  до  $+155$ . Эти значения обеспечивают достаточный отвод тепла от электронных компонентов, невысокую массу узла и необходимый температурный запас по условиям эксплуатации и процессов пайки.

### 8.2.2.2 Расчет габаритов функциональной ячейки

Габаритные размеры функциональной ячейки определяются из условия обеспечения размещения всех электрорадиоэлементов на печатной плате с учётом технологических зазоров и трассировки проводников. Согласно результатам анализа элементной базы (таблица 8.1), суммарная установочная площадь ЭРЭ составляет:

$$S_e = 2178,1 \text{ мм}^2$$

Оцениваем площадь печатной платы:

$$S_{\text{ПП}} = q_s * S_e$$

где

–  $q_s$  - коэффициент дезинтеграции по площади, учитывающий технологические зазоры и трассировку (для двусторонней платы средней сложности принимаем  $q_s = 1,8$ ). Тогда

$$S_{\text{ПП}} = 1,8 * 2178,1 = 3920,6 \text{ мм}^2$$

Фактические габаритные размеры печатной платы функциональной ячейки по сборочному чертежу составляют  $L = 103$ ,  $B = 88$ , площадь платы тогда равна

$$S_{\Phi\text{Я}} = L * B = 103 * 88 = 9064 \text{ мм}^2$$

Полученная площадь существенно превышает расчётную требуемую площадь.

$$\frac{L}{B} = \frac{1,85}{2,27} = 1,17$$

находится в рекомендуемом диапазоне  $1 \leq \frac{L}{B} \leq 2$ . Таким образом, принятые габариты функциональной ячейки  $103 \times 88$  мм обеспечивают размещение всех элементов с необходимым технологическим запасом площади и соответствуют требованиям методики расчёта печатных плат.

На основании принятых габаритов можно оценить коэффициент использования площади коммутационной платы:

$$K_{\text{пл}} = \frac{S_3}{S_{\text{факт}}} \approx \frac{2178,1}{9064} \approx 0,24$$

что соответствует рациональному использованию площади для устройства средней плотности монтажа.

### **8.2.2.3 Расчет класса точности печатной платы и числа слоев**

Выбор класса точности печатной платы выполняется на основании рассчитанных минимальных значений ширины печатного проводника и зазора между проводниками, а также минимального шага выводов применяемых элементов. Нормируемые значения этих параметров по классам точности приведены в таблице 8.2 по ГОСТ Р 53429-2009, в котором установлено семь классов точности изготовления печатных плат.

Таблица 8.2 - Таблица классов точности

Условное обозначение параметра	Класс точности						
	1	2	3	4	5	6	7
W, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1	0,075	0,05
b, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1	0,075	0,05
b <sub>H2</sub> , мм	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025	0,02	0,015
k <sub>ΔT</sub>	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2	-	-

Для выбора класса точности сначала оценивается минимально допустимая ширина печатного проводника. Площадь платы функциональной ячейки по габаритам  $L = 103$  мм,  $B = 88$  мм равна

$$S_{\Phi\text{я}} = L * B = 103 * 88 = 9064 \text{ мм}^2$$

Общее число выводов всех установленных элементов по результатам анализа элементной базы составляет  $\sum_{i=1}^M N_{\text{выв}i} = 162$ . Число печатных проводников оцениваем с учётом коэффициента использования выводов  $k_u = 0,6$

$$N_{\Pi\Pi} = \left( \sum_{i=1}^M N_{\text{выв}i} * K_i \right) * k_u$$

$$N_{\Pi\Pi} = 162 * 0,6 = 97$$

Средняя длина печатного проводника определяется по выражению

$$l_{\text{cp}} = \frac{L + B}{3} = \frac{103 + 88}{3} = 64 \text{ мм}$$

Если принять ширину проводника равной расстоянию между соседними проводниками ( $W = b$ ), то минимальная ширина проводника, обеспечивающая возможность разводки всех межсоединений на выбранной площади платы, вычисляется по формуле

$$W_{\min} \leq \frac{3 * (L * B) * \beta}{2 * N_{\Pi\Pi} * (L + B)}$$

Подставляя численные значения, получаем

$$W_{\min} \leq \frac{3 * 9064 * 0,8}{2 * 97 * (103 + 88)} = 0,59 \text{ мм}$$

Сравниваем полученное значение с нормативными минимальными ширинами печатных проводников по классам точности в таблице 8.2. Для 1-го класса  $W = 0,75 \text{ мм} > 0,59 \text{ мм}$ , поэтому разводка всех соединений на данной площади платы при таком классе невозможна. Для 2-го класса  $W = 0,45 \text{ мм} > 0,59 \text{ мм}$ , следовательно, по возможностям разводки достаточно 2-го класса точности.

Далее учитываем ограничения по расстоянию между контактными площадками. Для корпуса SOT-23 оценочный размер контактной площадки

$$D_{\Pi M} \approx 1,3 D$$

Подставляя численное значение,

$$D_{\Pi M} \approx 1,3 * 0,44 \approx 0,57 \text{ мм}$$

Для контроля класса точности по расстоянию между контактными площадками рассмотрим элементы с наименьшими геометрическими размерами выводов. Среди применяемых ЭРЭ наиболее «критичным» по шагу выводов является транзистор VT4 (MMBF4391L) в корпусе SOT-23. шаг между соседними выводами  $l = 0,95 \text{ мм}$ , ширина вывода по паспортным данным  $D \approx 0,44 \text{ мм}$ . Размер контактной площадки элемента, монтируемого на поверхность, в первом приближении принимаем

Минимальное расстояние между внешними сторонами контактных площадок соседних выводов определяется из условия

$$b_{min} \leq l - D_{\Pi M}$$

откуда для корпуса SOT-23 получаем

$$b_{min} \leq 0,95 - 0,57 = 0,38$$

Для элементов выводного монтажа диаметр металлизированных отверстий определяется диаметром выводов и технологическими допусками. Для применяемых в конструкции ЭРЭ по паспортным данным диаметр выводов составляет  $d_{\text{в}} = 0,5$  мм, поэтому расчётный диаметр отверстий составляет  $d_{\text{отв}} = 0,8$  мм

$$D_{\text{мо}} = (d + \Delta d_{BO}) + 2b + \Delta t_{BO} + 2\Delta d_{TP} + \sqrt{Td^2 + TD^2 + \Delta t_{HO}^2}$$

где

- $b = 0,1$  мм – допуск диаметра отверстия
- $\Delta d_{BO} = 0,1$  мм – допуск диаметра контактной площадки,
- $\Delta t_{BO} = 0,1$  мм – допуск на травление металлизации,
- $T_d = 0,05$  мм – позиционные допуски отверстия и площадки,
- $\Delta t_{HO} = 0,12$  мм – допуск несоосности отверстия и площадки.

Подставляя значения, получаем

$$D_{\text{мо}} = 1,35 \text{ мм}$$

Для типового шага выводов  $1 = 2,54$  мм минимальное расстояние между внешними сторонами контактных площадок будет

$$b_{\min} \leq 2,54 - 1,35 = 1,19 \text{ мм}$$

Сравнение показывает, что определяющим является элемент с поверхностным монтажом в корпусе SOT-23, для которого минимальное расстояние между площадками  $b_{\min} \approx 0,38$  мм. Согласно нормативным значениям минимального расстояния между проводниками и контактными площадками (таблица по классам точности), такое значение требует не ниже 3-го класса точности (для которого  $b = 0,25$  мм). Поскольку ранее по расчёту минимальной ширины проводника получено  $W_{\min} \approx 0,59$  мм, что также

удовлетворяется при 3-м классе (норматив  $W=0,25$  мм), окончательно для печатной платы функциональной ячейки принимается 3-й класс точности изготовления при двухслойном исполнении.

По таблице классов точности такое значение зазора обеспечивается не ниже 3-го класса (норматив  $b_3 = 0,25$  мм). Таким образом, с учётом геометрии выводов окончательно принимаем 3-й класс точности изготовления печатной платы.

Необходимое число сигнальных слоёв платы определяется соотношением

$$n_{cc} \geq [W_{\min i} / W_{\min}] + 1$$

где

- $W_{\min i}$  – минимальная ширина проводника  $i$ -го класса точности.

Для 2-го класса:

$$n_{cc} \geq \left[ \frac{0,25}{0,59} \right] + 1 = 1$$

С учётом конструктивного решения узла и необходимости размещения проводников на обеих сторонах платы принимаем  $n_{cc} = 2$

Следовательно, печатная плата электронного коммутатора сигналов выполняется как двухслойная, без выделения отдельных сплошных слоёв земли и питания; необходимые участки «земли» и питающих шин формируются полигонами на обоих слоях платы.

#### 8.2.2.4 Выбор толщины ПП

Номинальная толщина печатной платы определяется выбором материала основания и регламентируется требованиями ГОСТ Р 53429-2009

для плат общего применения. Для двусторонних печатных плат на стеклотекстолите FR-4 при умеренных механических нагрузках и габаритах порядка 100×90 мм рационально применять стандартную толщину основания 1,5 мм, к которой добавляется толщина медной фольги и защитных покрытий. Принятая толщина обеспечивает достаточную жёсткость функциональной ячейки, удобство монтажа выводных элементов и соответствует типовым возможностям производства печатных плат. С учётом выбранного материала и толщины основы для дальнейших расчётов принимается типоразмер заготовки FR4-35/35-1,5.

### 8.3 Анализ конструкции изделия

#### 8.3.1 Выбор системы охлаждения

Максимальная температура окружающей среды по заданию на изделие составляет  $T_{\text{ос.макс}} = 40^{\circ}\text{C}$ . Минимальное значение максимально допустимой температуры корпуса среди установленных элементов (разъёмы RS-105A, кнопка PB22E07 и др.) по таблице 8.1 равно  $T_{\text{доп.мин}} = 70^{\circ}\text{C}$ . Тогда допустимый перегрев функциональной ячейки

$$\Delta T_{\text{доп}} = T_{\text{доп.мин}} - T_{\text{ос.макс}} = 70 - 40 = 30^{\circ}\text{C}$$

По техническому заданию потребляемая мощность коммутатора не превышает  $P_{\text{потр}} = 0,6 \text{ Вт}$ . Для маломощного электронного устройства практически вся потребляемая мощность преобразуется в тепло, поэтому мощность рассеяния принимаем  $P_{\text{рас}} = 0,6 \text{ Вт}$ .

Функциональная ячейка имеет форму прямоугольного блока с габаритами  $L = 103 \text{ мм}$ ,  $B = 88 \text{ мм}$  и ориентировочной высотой  $H = 20 \text{ мм}$  (по наибольшей высоте элементов на плате). Площадь наружной поверхности, омываемой воздухом,

$$S_{\text{поверхн}} = 2 * (L \times W + L \times H + W \times H) = \\ = 2 * (103 * 88 + 103 * 20 + 88 * 20) = 25768 \text{ мм}^2$$

Плотность теплового потока рассчитывается по методике Приложения В методики расчета как

$$\rho_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{расc}}}{S_{\text{поверхн}}}$$

$$\rho_{\text{уд}} = \frac{0,6}{0,0258} = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

По диаграмме выбора системы охлаждения, показанной на рисунке 8.2 при плотности теплового потока порядка  $\rho_{\text{уд}} = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  и допустимом перегреве  $\Delta T_{\text{доп}} = 30^\circ\text{C}$  рабочая точка попадает в область 1, соответствующую естественному воздушному охлаждению.

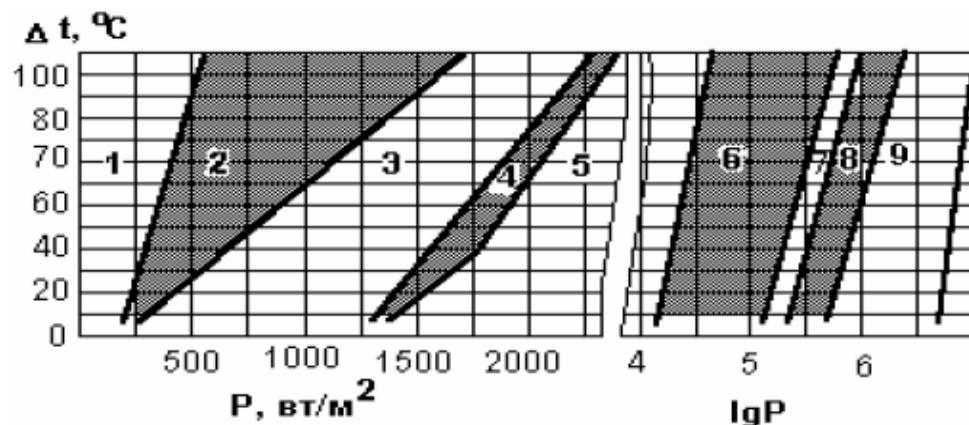


Рисунок 8.2 – Диаграмма системы охлаждения конструкции

Зоны:

1 – естественное воздушное охлаждение

2 – естественное и принудительное воздушное охлаждение

3 – принудительное воздушное охлаждение

- 4 – принудительное воздушное и жидкостное охлаждение
- 5 – принудительное жидкостное охлаждение
- 6 – принудительное жидкостное и естественное испарительное
- 7 – принудительное жидкостное, принудительное и естественное испарительное
- 8 – естественное и принудительное испарительное
- 9 – принудительное испарительное

Следовательно, для электронного коммутатора сигналов достаточно организации теплоотвода за счёт естественной конвекции и теплоизлучения без применения специальных радиаторов и устройств принудительного обдува; дополнительных мероприятий по охлаждению конструкция не требует.

### **8.3.2 Расчет перекрестных помех электрических коротких линий связи**

Цифровым элементом в конструкции является управляющий вход SW1 микросхем NJM2233B (DA1, DA2), определяющий выбор одного из двух аудио- и видеовходов. Управляющий сигнал формируется транзисторным узлом на VT1, VT2 и кнопкой SB1.

Согласно Приложению Д методических указаний функциональная ячейка считается помехоустойчивой, если амплитуда перекрёстной помехи не превышает допустимого значения статических помех.

$$U_{\text{пом}} < U_{\text{пом доп}},$$

где

- $U_{\text{пом}}$  – амплитуда перекрёстной помехи,
- $U_{\text{пом доп}}$  – допустимый уровень статических помех

Из даташита NJM2233B и принципиальной схемы принимаем:

- В устройстве используется  $V^+ = 10,5$  В
- Типичная полоса пропускания по уровню  $-3$  дБ:  $f_B = 10$  МГц
- размах видеосигнала на выходе при типовом режиме:  $\Delta U = 2$  В
- Выходное сопротивление усилителя:  $R_{\text{вых}} = 10$  Ом.

Геометрия печатной платы ФЯ:

- длина  $L=103$  мм, ширина  $B=88$  мм.

Амплитуда перекрёстной помехи между двумя параллельными печатными линиями определяется суммарным влиянием ёмкостной и индуктивной связи:

$$U_{\text{пом}} = \frac{\Delta U * C_{B3} * R_{\text{вых}}}{\tau_{\Phi \text{ мин}}} + \frac{\Delta I * M}{\tau_{\Phi \text{ мин}}}$$

Здесь:

$\Delta U = U_{1 \text{ макс}} - U_{0 \text{ мин}}$  - максимальное значение напряжения переключения на выходе ИС.

$C_{B3}$  – взаимная ёмкость двух соседних ЛС.

$$C_{B3} = C_{B3 \text{ 0}} * \overline{l_{B3}},$$

$C_{B3 \text{ 0}}$  – погонное значение взаимной ёмкости ( $\text{nФ/м}$ ).

Если ширина печатных проводников равна расстоянию между ними, то

$$C_{B3 \text{ 0}} \approx 95 \frac{\text{nФ}}{\text{м}}.$$

$\overline{l_{B3}}$  – средняя длина взаимного участка соседних ЛС.

$$\overline{l_{B3}} \approx (L + B)/3,$$

Где  $L$ ,  $B$  – габариты печатной платы.  $R_{\text{вых}}$  – выходное сопротивление ИС.

$$\overline{l_{B3}} = 64 \text{ мм}$$

$$C_{B3} = 0,065 * 95 * 10^{-12} = 6 \text{ пФ}$$

Погонная взаимоиндукция при тех же геометрических параметрах  $M_0 \approx 0,53 \text{ мкГн/м}$ , поэтому

$$M = 0,53 * 10^{-6} * 0,064 = 34 \text{ нГн}$$

Для оценки минимальной длительности фронта используем соотношение

$$\tau_{\Phi \text{ мин}} = 0,35 * \frac{1}{F_{\text{такт}}} = 0,35 * \frac{1}{10 \text{ МГц}} = 35 \text{ нс}$$

Изменение тока в возмущающей линии при переключении:

$$\Delta I \approx \frac{\Delta U * C_H}{\tau_{\Phi \text{ мин}}}$$

$$\Delta I \approx \frac{2 * 12 * 10^{-12}}{35 * 10^{-9}} = 0,69 \text{ мА}$$

$$U_{\text{пом}} = \frac{\Delta U * C_{B3} * R_{\text{вых}}}{\tau_{\Phi \text{ мин}}} + \frac{\Delta I * M}{\tau_{\Phi \text{ мин}}}$$

$$U_{\text{пом}} = \frac{2 * 6 * 10^{-12} * 10}{35 * 10^{-9}} + \frac{0,60 * 10^{-3} * 3,4 * 10^{-9}}{35 * 10^{-9}} = 4,2 \text{ мВ}$$

Для обеспечения отношения сигнал/помеха не хуже 40 дБ примем допустимый уровень перекрестной помехи на уровне

$$U_{\text{пом доп}} = 0,02 \Delta U = 0,04 \text{ В}$$

Тогда

$$U_{\text{пом}} \ll U_{\text{пом доп}}$$

Условие помехоустойчивости выполняется с большим запасом: амплитуда перекрёстной помехи почти на один порядок меньше допустимой. Следовательно, при выбранной конструкции печатной платы и применении микросхем NJM2233В функциональная ячейка по уровню перекрёстных помех удовлетворяет требованиям помехоустойчивости.

## 8.4 Разработка технологии сборки

### 8.4.1 Расчет конструкторских показателей технологичности

Для оценки технологичности конструкции функциональной ячейки рассчитаем коэффициенты повторяемости компонентов и материалов, коэффициент стандартизации конструкции и коэффициент использования площади печатной платы.

1) Коэффициент повторяемости компонентов:

$$K_{\text{п.к}} = 1 - \frac{N_{\text{типов}}}{N_{\text{общ}}} = 1 - \frac{16}{70} = 0,77$$

где  $N_{\text{типов}}$  – число типоразмеров ЭРЭ и компонентов (к примеру: типоразмер 0805 у резистора и т.д.);  $N_{\text{общ}}$  – общее число ЭРЭ и компонентов.

2) Коэффициент повторяемости материалов:

Оценивает разнообразие материалов, используемых для составных частей конструкции:

$$K_{\text{повт}} = 1 - \frac{N_{\text{в.м.}}}{N_{\text{дет.}}} = 1 - \frac{2}{3} = 0,33$$

где  $N_{\text{в.м.}}$  – количество марок материалов, применяемых для составных частей конструкции;  $N_{\text{дет.}}$  – количество нестандартных деталей, изготавливаемых из этих материалов.

3) Коэффициент стандартизации конструкции:

$$K_{\text{станд}} = 1 - \frac{N_{\text{ориг.д.}} + N_{\text{дет}}}{N_{\text{общ}} + N_{\text{дет}}} = 1 - \frac{0 + 3}{73 + 3} = 0,96$$

где:  $N_{\text{ориг.д.}}$  – количество нестандартных (оригинальных) электрорадиокомпонентов, включая МСБ (компонентов "частного" применения).

4) Коэффициент использования площади платы:

$$K_{\text{исп.пл.}} = \frac{S_{\text{ЭРЭ}}}{S_{\text{пл}}} = \frac{2178,1}{9064} = 0,24$$

Полученные значения показывают, что конструкция функциональной ячейки характеризуется высокой повторяемостью типоразмеров элементов  $K_{\text{п.к.}}=77\%$ , достаточной унификацией применяемых материалов  $K_{\text{повт}} = 0,33$  и высоким уровнем стандартизации ( $K_{\text{станд}} = 0,96$ ). Коэффициент использования площади платы  $K_{\text{исп.пл.}} = 0,24$  свидетельствует о наличии резерва свободного места, что упрощает монтаж и допускает дальнейшую модернизацию схемы без изменения габаритов функциональной ячейки.

#### **8.4.2 Расчет производительных показателей технологичности**

Производственные показатели характеризуют технологический процесс изготовления и сборки функциональной ячейки и оцениваются после выбора структуры технологического процесса.

- 1) Коэффициент ограничения числа видов монтажно-сборочных операций:

$$K_{\text{огр.сбор.опер.}} = 1 - \frac{N_{\text{вид.с.о.}}}{N_{\text{пар.с.}}} = 1 - \frac{3}{74} = 0,96$$

где  $N_{\text{пар.с.}}$  – число пар механических и (или) электрических соединяемых любым способом элементов, деталей и составных частей (радиоэлементы-плата, крышка-корпус, корпус-ФЯ и т.д.);  $N_{\text{вид.с.о.}}$  – число конкретных технологических способов, используемых для образования механических или электрических соединений в паре соединяемых элементов, деталей, частей (пайка, клей, винтовое соединение).

Значение близко к единице, что говорит об ограниченном числе применяемых способов соединения.

- 2) Коэффициент использования групповых методов:

$$K_{\text{исп}} = \frac{N_{\text{гр}}}{N_{\text{тп}}} = \frac{3}{4} = 0,75$$

$N_{\text{тп}}$  – общее количество операций и (или) групп операций, предусмотренных в структуре ТП, т.е. в разработанном варианте структурной технологической схемы (СТС), функционально-технологической схемы (ФТС) или технологической схемы сборки (ТСС);  $N_{\text{гр}}$  – количество операций и (или) групп операций из  $N_{\text{тп}}$ , основанных на групповых методах (обработки, монтажа, сборки, регулировки и т.д.).

Данный показатель ( $K_{исп}$ ) точно может быть определен по результатам анализа маршрутной карты ТП.

3) Коэффициент автоматизации и механизации монтажа:

$$K_{авт} = \frac{N_{a.m}}{N_{мон}} = \frac{46}{80} = 0,58$$

где:  $N_{мон}$  - общее количество электрических и (или) механических монтажных и силовых (закрепляющих) соединений;  $N_{a.m}$  - число соединений из  $N_{мон}$ , выполняемых автоматизированным и механизированным способом.

4) Коэффициент применения типовых ТП:

Для данного изделия практически все операции (подготовка ПП, нанесение пасты, пайка, мойка, контроль) реализуются по типовым, отработанным процессам

$$K_{авт} = \frac{N_{тпп}}{N_{пп}} = \frac{4}{4} = 1$$

где:  $N_{тпп}$  - число операций и (или) групп операций из  $N_{пп}$ , выполняемых по типовым технологиям, установленным в ОСТ, стандарте предприятия или ином нормативно - технологическом документе отрасли или группы кооперирующихся предприятий.

Суммарно полученные производственные показатели свидетельствуют о высокой технологичности выбранного варианта технологического процесса сборки функциональной ячейки и его соответствии рекомендуемым значениям для серийного производства печатных узлов.

### 8.4.3 Комплексная оценка технологичности

Оценка частных показателей технологичности в баллах производится по формуле:

$$B_i = 4 - \frac{K_{hi} - K_{pi}}{\Delta K_i}$$

где

$K_{hi}$  – нормальный уровень показателя, действующий на данный момент в отрасли;

$\Delta K_i$  – эквивалент “одного балла”, отражающий значимость данного показателя технологичности;  $K_{pi}$  – расчетное значение частных показателей технологичности.

Таблица 8.4 – Таблица оценки технологичности

Частотные показатели технологичности ( $K_i$ )	Нормативное значение $K_{hi}$	Эквивалент одного балла $\Delta K_i$	Расчетный показатель $K_{pi}$	Расчетный показатель в баллах $B_i$
Конструкторские показатели				
Коэффициент повторяемости компонентов и МСБ	0.95	0.2	0,77	2,8
Коэффициент повторяемости материалов	0.7	0.25*K <sub>hi</sub>	0,25	1,93
Коэффициент стандартизации	0.85	0.25*K <sub>hi</sub>	0,95	4,24
Коэффициент Использования площадки коммутационных плат	0.6	0.1	0,45	5

#### Продолжение таблицы 8.4

Производственные показатели				
Коэффициент ограничения числа видов сборочно-монтажных соединений	0.9	0.1	0,96	4,6
Коэффициент использования групповых методов	0.4	0.25	0,8	5.068
Коэффициент автоматизации и механизации	0.87	0.3	0,74	3,57
Коэффициент применения типовых ТП	0.6	0.15	1	6.667

Комплексная оценка технологичности определяется по среднебалльному показателю:

$$B_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N B_i}{N}$$

$$\sum_{i=1}^N B_i = 27,14$$

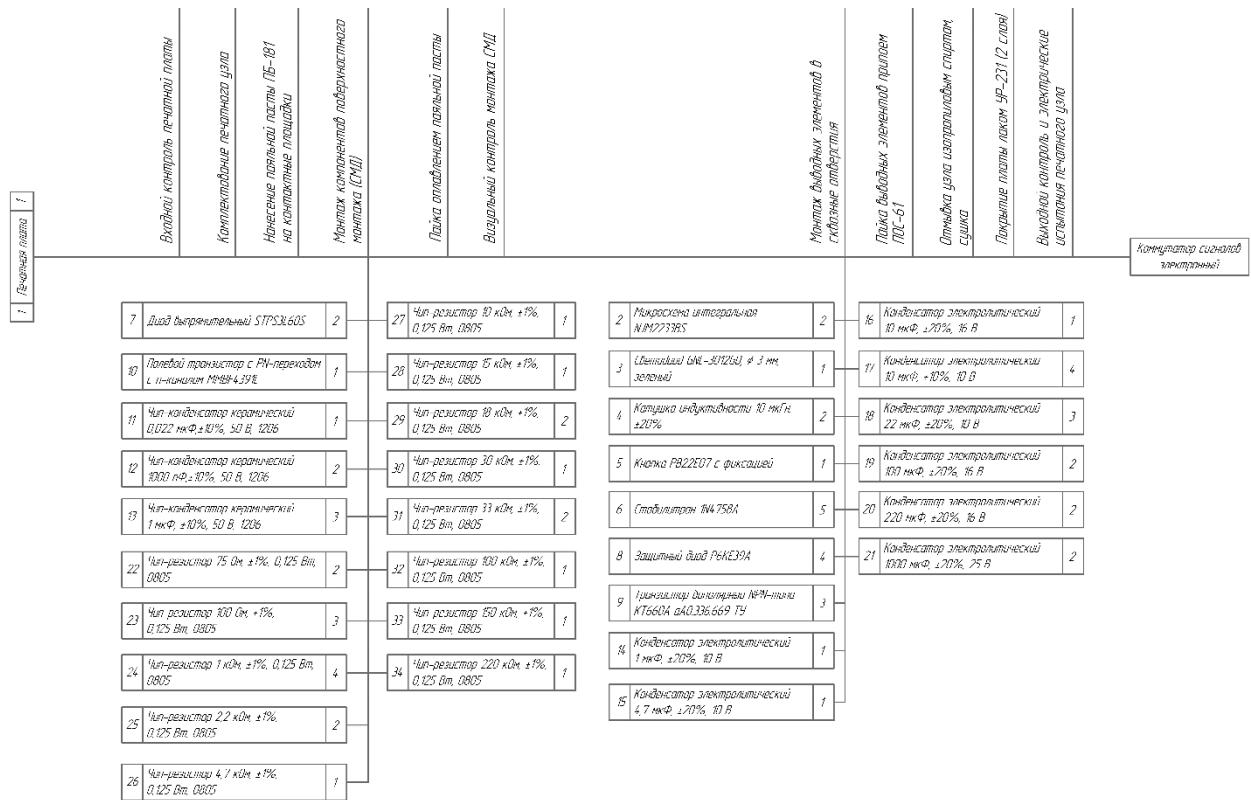
$$B_{cp} = \frac{27,14}{8} = 3,39.$$

По последним результатам данного пункта можно сделать вывод, что комплексная оценка технологичности является удовлетворительной.

#### 8.4.4 Разработка технологической схемы сборки

Дает представление о процессе сборки изделия и его частей. Изображается в виде линии, на входе которой базовая деталь (печатная плата), а на выходе изделие в сборе. Над линией обозначаются операции и способы их выполнения. Под линией обозначаются изделия в виде прямоугольников,

над которыми выполняется операция. Технологическая схема сборки представлена на рисунке 8.3.



### Рисунок 8.3 – Технологическая схема сборки

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была достигнута поставленная цель по разработке инструментальных и программных средств для оценки точности эфемеридно-временной информации и навигационного поля ГНСС на основе разработанной в рамках этапе ОКР «Доверие-МАИ» методики. На основе анализа структуры и функций системы контроля космического сегмента определены оцениваемые параметры ЭВИ и навигационного поля, сформированы требования к исходным данным и их форматам, реализован программно-алгоритмический комплекс расчёта ошибок эфемерид и частотно-временных параметров, в пространстве и характеристик навигационного поля.

Дополнительно создана система представления результатов, включающая формирование отчётных таблиц и наглядную визуализацию карт навигационного поля и сводных показателей.

Проведённые вычислительные эксперименты подтвердили работоспособность и реализованной методики, а также её согласованность с существующими представлениями о точности современных навигационных систем. Получено качественное представление о вкладе космического сегмента в ошибки навигационного решения, о влиянии геометрии орбитальной группировки на структуру навигационного поля и о преимуществах совместного использования нескольких ГНСС по точности и доступности навигационного обслуживания. В расчётных сценариях вклад погрешностей ЭВИ космического сегмента в общую ошибку навигационного решения для «идеального» приёмника составлял до 80–90 % суммарной 3D-ошибки, изменение геометрии созвездия при фиксированном качестве ЭВИ приводило к изменению 95-процентной пространственной ошибки и доступности решения примерно в 1,3–1,5 раза между «хорошой» и «невыгодной» конфигурациями, а совместное использование GPS и

ГЛОНАСС обеспечивало дополнительное снижение 95-процентной 3D-ошибки и рост доступности навигационного решения примерно в 1,5–2 раза по сравнению с работой каждой системы отдельно.

По результатам расчётов видно, что даже при сопоставимом уровне ЭВИ структура НП существенно зависит от геометрии орбитальной группировки. Над территорией России конфигурация ГЛОНАСС обеспечивает более равномерное распределение точности, тогда как в глобальном масштабе преимущество имеет система GPS. Совместное использование двух систем приводит к снижению трёхмерной ошибки навигационного решения и выравниванию НП, что устраняет локальные области ухудшения характеристик, характерные для одиночных созвездий.

Разработанный программный комплекс может быть использован как практический инструмент для мониторинга качества ЭВИ и навигационного поля, сопоставления навигационных систем и анализа эффективности их совместного применения, а также служить основой для последующего расширения с учётом дополнительных источников ошибок и интеграции в действующие системы контроля.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Марков С.С. Создание составных частей центра контроля и подтверждения характеристик ГНСС в части средств оценки функциональных характеристик ГНСС и погрешностей решения навигационной задачи в НАП. Пояснительная записка к методике определения функциональных характеристик ГЛОНАСС и GPS. МАИ, 2015, МВАУ.00402-01 81 01.
2. Поваляев А.А., Вейцель А.В., Мазепа Р.Б. «Глобальные спутниковые системы синхронизации и управления движением в околосемном пространстве», учебное пособие – М: «Вузовская книга», 2012.
3. «RINEX The Receiver Independent Exchange Format version 3.02» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex302.pdf>
4. International GNSS Service (IGS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://igs.org>
5. Global Geocentric Coordinate System. Methodology of PZ-90.02 / Russian Federation, Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography // ICG-7, Working Group D – Reference Frames, Timing and Applications. – Nashville, 2012. – 15 с. – Режим доступа: <https://www.unoosa.org>
6. World Geodetic System 1984 (WGS 84) / National Geospatial-Intelligence Agency (NGA). – Официальный сайт управления геоматики NGA. – Режим доступа: <https://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/>
7. Python Software Foundation. Официальная документация языка программирования Python, версия 3.x [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.python.org/3/>

8. NumPy Developers. NumPy: User Guide and Reference Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://numpy.org/doc/>
9. ECMA International. ECMAScript® 2024 Language Specification (ECMA-262, 15th edition) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tc39.es/ecma262/> (дата обращения: 01.12.2025).
10. WHATWG. HTML: Living Standard. Раздел «The canvas element» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://html.spec.whatwg.org/multipage/canvas.html> (дата обращения: 01.12.2025).
11. Экономическое обоснование дипломных проектов (работ) по приборо- и радиоприборостроению. Под редакцией д. э. н., профессора Панагушина В. П., М.: Изд. МАИ, 2018. – 42 с.
12. СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда»: санитарные правила; утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 02.12.2020 № 40 (зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2020 № 61893).
13. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 (зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62296).
14. ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».
15. ГОСТ 12.1.003-2014 «Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности».
16. ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования».

17. ГОСТ 12.1.019-2017 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
18. ГОСТ 12.1.030-81 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление».
19. ГОСТ 12.2.032-78 «Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».
20. ГОСТ Р 50923-96 «Оборудование офисов. Рабочее место оператора персонального компьютера. Общие эргономические требования и требования безопасности».
21. ГОСТ Р 52324-2005 «Эргономические требования к работе с визуальными дисплейными терминалами, основанными на плоских панелях».
22. ГОСТ Р 12.1.038-2024 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов».
23. СП 52.13330.2016 «Свод правил. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*».
24. СП 51.13330.2011 «Свод правил. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003».
25. СП 12.13130.2009 «Свод правил. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».
26. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. «Правила устройства электроустановок. Электроустановки зданий и сооружений» (с учётом действующих изменений).
27. Р 2.2.2006-05 «Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 29.07.2005).

28. Приказ Минтруда России от 21.11.2023 № 817н «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению» (зарегистрировано в Минюсте России 30.11.2023 № 76179).
29. Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» (в ред. действующего законодательства).
30. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (в ред. действующего законодательства).
31. Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» (в ред. действующего законодательства).
32. Беков Б. Е., Бобков Н. И., и др. Производственное освещение авиастроительных предприятий: Методические указания к разделу «Охрана труда». — М.: Московский авиационный институт, 1987. - 50 с.
33. ChipDip: интернет-магазин электронных компонентов и радиодеталей: сайт. — URL: <https://www.chipdip.ru/> (дата обращения: 15.11.2025).
34. Данные электронных компонентов по каталогам производителей и техническим описаниям: <https://www.alldatasheet.com/> (дата обращения: 15.11.2025).
35. Проектирование РЭС. Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию. / В.Ф. Борисов, А.А. Мухин, М.Ф. Митюшин, А.Н. Шишков, Ю.В. Чайка. — М.: Изд-во МАИ, 2007. — 95 с.: ил.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. Модуль расчёта ошибок ЭВИ

```
def _rnb_basis(r, v):
    R = np.full_like(r, np.nan, float); N = R.copy(); B = R.copy()
    for i,(ri,vi) in enumerate(zip(r,v)):
        if not (np.all(np.isfinite(ri)) and np.all(np.isfinite(vi))): continue
        eR = ri/np.linalg.norm(ri); eB = np.cross(ri,vi); eB/=np.linalg.norm(eB)
        R[i], N[i], B[i] = eR, np.cross(eB,eR), eB
    return R, N, B

def _derive_central(t,y):
    out=np.full_like(y,np.nan,float)
    if len(y)<2: return out
    for i in range(1,len(y)-1):
        dt=t[i+1]-t[i-1]
        if dt!=0 and np.isfinite(y[i-1]) and np.isfinite(y[i+1]):
            out[i]=(y[i+1]-y[i-1])/dt
    return out

def build_error_components(ref, brd):
    # ECEF разности координат/скоростей
    dX,dY,dZ = ref.r[:,0]-brd.r[:,0], ref.r[:,1]-brd.r[:,1], ref.r[:,2]-brd.r[:,2]
    dVX,dVY,dVZ = ref.v[:,0]-brd.v[:,0], ref.v[:,1]-brd.v[:,1], ref.v[:,2]-brd.v[:,2]
    # Орбитальные проекции R/N/B
    Rb,Nb,Bb = _rnb_basis(ref.r, ref.v)
    dR = np.sum(np.stack([dX,dY,dZ],1)*Rb,1)
    dN = np.sum(np.stack([dX,dY,dZ],1)*Nb,1)
    dB = np.sum(np.stack([dX,dY,dZ],1)*Bb,1)
    dVR = np.sum(np.stack([dVX,dVY,dVZ],1)*Rb,1)
    dVN = np.sum(np.stack([dVX,dVY,dVZ],1)*Nb,1)
    dVB = np.sum(np.stack([dVX,dVY,dVZ],1)*Bb,1)
    # Часы и d/dt
    d_clk = ref.clk - brd.clk
    d_freq = ref.freq - brd.freq if getattr(ref,"freq",None) is not None else _derive_central(ref.t, d_clk)
    # Маски пригодности
    dr3d = np.sqrt(dX**2+dY**2+dZ**2)
    mask_pos = np.isfinite(dr3d) & (dr3d <= MAX_POS_ERR_M)
    dT_ns = d_clk*1e9
    mask_clk_abs = np.isfinite(d_clk) & (np.abs(dT_ns)<=MAX_CLK_ERR_NS)
    jump_ns = np.full_like(dT_ns,np.nan); jump_ns[1:]=np.abs(dT_ns[1:]-dT_ns[:-1]);
    jump_ns[0]=jump_ns[1]
    mask_clk_jump = np.isfinite(jump_ns) & (jump_ns<=MAX_DCLK_JUMP_NS)
    rate_mps = C*d_freq
    mask_clk_freq = np.isfinite(rate_mps) & (np.abs(rate_mps)<=MAX_FREQ_RATE MPS)
```

```
mask_clk = mask_clk_abs & mask_clk_jump & mask_clk_freq
mask_health = np.array(brd.healthy,bool) if getattr(brd,"healthy",None) else
np.ones_like(mask_pos,bool)
return SatErrorComponents(dX=dX,dY=dY,dZ=dZ,dVX=dVX,dVY=dVY,dVZ=dVZ,
dR=dR,dN=dN,dB=dB,dVR=dVR,dVN=dVN,dVB=dVB,
d_clk=d_clk,d_freq=d_freq,
mask_pos=mask_pos,mask_clk=mask_clk,mask_health=mask_health)
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Функции расчета показателей SISRE/SISVE

```
def _k_tan(system): return SISRE_K_TAN_GLO if (system or "").upper() in ("GLO","GLONASS") else SISRE_K_TAN_GPS

def sisre_satellite(errors, sat, debias=False):
    d_clk = np.array(errors.d_clk, float, copy=True)
    if debias:
        valid = errors.mask_all & np.isfinite(d_clk)
        if np.any(valid): d_clk[valid] -= np.nanmedian(d_clk[valid])
    k_tan = _k_tan(sat.system)
    sisre = np.sqrt((SISRE_K_RADIAL*errors.dR)**2 +
                    (k_tan*errors.dN)**2 +
                    (k_tan*errors.dB)**2 +
                    (SISRE_K_RADIAL*C*d_clk)**2)
    mask = errors.mask_pos & errors.mask_clk & errors.mask_health & np.isfinite(sisre)
    out = np.array(sisre, float); out[~mask] = np.nan
    return out

def _params(system):
    return (SISRE_K_TAN_GLO, SISVE_D_MEAN_GLO, SISVE_DDOT_MEAN_GLO,
            SISVE_V_REL_GLO) \
        if (system or "").upper() in ("GLO","GLONASS") else \
        (SISRE_K_TAN_GPS, SISVE_D_MEAN_GPS, SISVE_DDOT_MEAN_GPS,
            SISVE_V_REL_GPS)

def sisve_satellite(errors, sat, debias=False):
    k_tan,D_mean,Ddot_mean,V_rel = _params(sat.system)
    if errors.d_freq is None or errors.d_freq.size != errors.dR.size:
        return np.full_like(errors.dR, np.nan, float)
    d_freq = np.array(errors.d_freq, float, copy=True)
    DV2 = (SISRE_K_RADIAL*errors.dVR)**2 + (C*d_freq)**2 + (k_tan*errors.dVN)**2 +
           (k_tan*errors.dVB)**2
    DRV2 = (V_rel/D_mean)**2 * (errors.dN**2)
    geom = (SISRE_K_RADIAL*errors.dR)**2 + (k_tan*errors.dN)**2 + (k_tan*errors.dB)**2
    DdotD2 = (Ddot_mean/D_mean)**2 * geom
```

```
sisve = np.sqrt(DV2 + DRV2 + DdotD2)
vel_ok = (np.isfinite(errors.dVR)&np.isfinite(errors.dVN)&np.isfinite(errors.dVB)
          & (np.abs(errors.dVR)<=MAX_VEL_ERR_MPS)
          & (np.abs(errors.dVN)<=MAX_VEL_ERR_MPS)
          & (np.abs(errors.dVB)<=MAX_VEL_ERR_MPS))
mask = errors.mask_pos & errors.mask_clk & errors.mask_health & vel_ok &
np.isfinite(sisve) & np.isfinite(d_freq)
out = np.array(sisve, float); out[~mask] = np.nan
return out
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ В. Модуль вычисления показателей точности навигационного поля

```
def _sigma_from_rec(los, d_xyz, d_clk, mode, geom_sigma):
    # В "geometry" используем фиксированную  $\sigma$ , иначе проектируем ошибку SISRE на линию визирования
    return geom_sigma if mode == "geometry" else max(abs(-np.dot(los, d_xyz) + C * d_clk), 1e-3)

def _los_and_elev(user_ecef, rot_enu, sat_pos):
    rho = sat_pos - user_ecef
    dist = np.linalg.norm(rho)
    if not np.isfinite(dist) or dist <= 0: return np.full(3, math.nan), math.nan
    los = rho / dist           # единичный вектор на спутник
    enu = rot_enu @ rho
    elev = math.atan2(enu[2], math.hypot(enu[0], enu[1]))
    return los, elev

def evaluate_navfield(time_cfg_path, grid_cfg_path, const_cfg_path, systems, mode):
    time_cfg = load_time_config(time_cfg_path)
    const_cfg = load_constants_config(const_cfg_path)
    grid_cfg = GridConfig.from_json(grid_cfg_path)
    grid = build_grid_points(grid_cfg)
    brdc, sp3, clk = _resolve_day_paths(time_cfg.date)
    provider = build_sisre_provider(brdc, sp3, clk, time_cfg.clock_calibration_path,
                                     systems=[s.upper() for s in systems])
    # Сетка по времени (навигационная)
    t_nav = _build_epoch_grid(time_cfg, provider.t_grid)
    idx_map = _map_times_to_indices(provider.t_grid, t_nav)
    # Подготовка пользователей (узлов сетки) в ECEF и матриц ENU
    users = []
    for lat, lon in grid:
        lat_r, lon_r = math.radians(lat), math.radians(lon)
        users.append((np.array(geodetic_to_ecef(lat_r, lon_r, 0.0)),
                      np.asarray(enu_rotation_matrix(lat_r, lon_r)), lat, lon))
```

```

sigma_lists = [[] for _ in users] # накопление σ3D по эпохам
pdop_lists = [[] for _ in users]
valid_counts = [0 for _ in users]
elev_min = math.radians(const_cfg.elevation_mask_deg)
pdop_max = getattr(const_cfg, "pdop_max", 6.0)
geom_sigma = getattr(const_cfg, "geometry_sigma_range_m", 1.0)
# Главный цикл по эпохам
for ep_idx, src_idx in enumerate(idx_map):
    if src_idx is None: continue
    recs = provider.epoch_records(src_idx)
    if not recs: continue
    for p_idx, (user_ecef, rot_enu, lat, lon) in enumerate(users):
        A_rows, sigmas = [], []
        for rec in recs:
            sys = sat_system_from_id(rec.sat_id)
            if systems and sys not in systems and rec.sat_id[0].upper() not in systems: continue
            los, elev = _los_and_elev(user_ecef, rot_enu, rec.pos_brd)
            if not np.all(np.isfinite(los)) or elev < elev_min: continue
            s = _sigma_from_rec(los, rec.d_xyz, rec.d_clk, mode, geom_sigma)
            A_rows.append(los); sigmas.append(s)
        if len(A_rows) < 4: # минимум 4 спутника
            continue
        A = np.asarray(A_rows, float)
        W = np.diag(1.0 / (np.asarray(sigmas) ** 2))
        try:
            except np.linalg.LinAlgError:
                continue
            pdop = math.sqrt(max(np.trace(Q), 0.0))
            if not np.isfinite(pdop) or pdop > pdop_max:
                continue # PDOP фильтр
            sigma_pos = math.sqrt(max(np.sum(np.diag(Q)), 0.0))
            valid_counts[p_idx] += 1

```

```

sigma_lists[p_idx].append(sigma_pos)
pdop_lists[p_idx].append(pdop)

# Сводка по узлам: доступность, RMS и p95
stats = []
total_epochs = len(t_nav)
for p_idx, (_, _, lat, lon) in enumerate(users):
    valid = valid_counts[p_idx]
    avail = 100.0 * valid / total_epochs if total_epochs else 0.0
    sigmas = np.asarray(sigma_lists[p_idx], float)
    pdops = np.asarray(pdop_lists[p_idx], float)
    rms = float(np.sqrt(np.nanmean(sigmas ** 2))) if sigmas.size else math.nan
    p95 = float(np.nanpercentile(sigmas, 95)) if sigmas.size else math.nan
    pdop_mean = float(np.nanmean(pdops)) if pdops.size else math.nan
    stats.append((lat, lon, avail, rms, p95, pdop_mean, total_epochs, valid))

```

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Сборочный чертеж ФЯ**

Сборочный чертеж приведён на отдельном листе формата А3.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Спецификация**

Спецификация приведена на 3 листах (лист 1–3) и прилагается отдельными листами формата А4.