

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»**

Институт ИРЭ Кафедра Светотехники

ЗАДАНИЕ

НА ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ (работу)

Направление 210100 Электроники и микроэлектроники
(номер и название)

Специальность 210103 Квантовая и оптическая электроника
(номер и название)

Специализация Видеоэлектроника
(номер и название)

Тема проекта (работы): Разработка фоточувствительного тракта звездного прибора с
улучшенными техническими характеристиками

Время выполнения проекта (работы) с 1.09.2012 по 15.02.2013 г.

Студент Старикова О.А. ЭР-06-07
фамилия, и., о., группа, подпись,

Руководитель проекта доцент к.т.н. Мартынов В.Н.
должность, звание, фамилия, и., о., подпись

Руководитель от предприятия _____

нач. отдела — Шелогаев В.Б.
должность, звание, фамилия, и., о., подпись

Консультант доцент к.т.н. Монахов А.Ф.
должность, звание, фамилия, и., о., подпись

Консультант ст.преп. — Козина З.П.
должность, звание, фамилия, и., о., подпись

Консультант _____
должность, звание, фамилия, и., о., подпись

Зав. кафедрой Григорьев А.А.
подпись, дата

Место выполнения проекта ФГУП МОКБ «МАРС»

Москва

“11” ноября 2012 г.

– Содержание задания и исходные данные к проекту (работе)

Подпись руководителя проекта (работы) _____ Дата _____

2. Задание по разделу «Охрана труда» _____
(специализированная часть проекта)

Подпись консультанта _____ Дата _____
(специализированная часть проекта)

3. Задание по экономической части _____
(специализированная часть проекта)

Подпись консультанта _____ Дата _____
(специализированная часть проекта)

4. Задание по _____
(специализированная часть проекта)

Подпись консультанта _____ Дата _____

Оглавление

Перечень сокращений	8
Введение	9
1 Приборы ориентации и навигации КА	11
1.1 Принцип использования астродатчиков для ориентации КА	11
1.2 История появления звездных приборов	13
1.3 Этапы развития звездных приборов	17
1.4. Тенденции развития современных звездных приборов	31
Техническое задание на разработку фоточувствительного тракта звездного прибора с улучшенными техническими характеристиками	36
Постановка задачи дипломного проекта	38
2 Принципы построения и работы астродатчика	40
2.1 Принцип действия АД	40
2.2 Состав и структурная схема АД	41
2.3 Функциональная схема астродатчика	44
2.4 Конструкция астродатчиков с фотоприемником типа ПЗС	47
2.5 Принцип работы астродатчиков с фотоприемником типа ПЗС	52
2.6 Функционирование астродатчика	55
3 Выбор и описание фотоприемника	56
3.1 Общее описание и технические характеристики фотоприемников (ФП) типа ПЗС	56
3.2. Требования к фотоприемнику	68
3.3. Обоснование выбора матрицы	68
3.4 Организация вывода информации с ФП	70
4 Расчетная оценка основных характеристик АД	71
4.1 Исходные данные для оценки основных характеристик АД	71
4.2 Оценка чувствительности АД	71
4.2.1 Оценка отношения сигнал/шум	72
4.2.2 Вероятностные характеристики обнаружения звёзд	82
4.3 Оценка погрешности измерения координат звёзд СКД.	85

4.4 Расчетные оценки по выбору поля зрения АД.....	102
4.4.1 Поле зрения АД.....	102
4.4.2 Обоснование оптимального поля зрения астродатчика.....	102
4.4.3 Расчёт поля зрения АД.....	106
4.5 Расчёт числа визируемых звёзд.....	109
4.6 Расчёт быстродействия.....	111
4.7 Оценка объемно-массовых характеристик фоточувствительного тракта АД.....	115
5 Отладочно-моделирующий стенд (ОМС).....	117
5.1 Назначение.....	117
5.2 Состав, функциональная схема стенда.....	117
5.3 Описание конструкции.....	121
6 Безопасность и экологичность проекта.....	123
6.1 Обеспечение электробезопасности отладочно-модулирующего стенда.....	123
6.1.1 Краткие характеристики работ в помещении.....	123
6.1.2 Оценка категории помещения по опасности поражения электрическим током.....	125
6.1.3 Система электроснабжения.....	126
6.1.4 Определение класса используемых приборов по способу защиты от поражения электрическим током.....	128
6.1.5 Защитное зануление. Расчет тока КЗ. Выбор автоматического выключателя.....	130
6.2 Обеспечение оптимальных условий труда в помещении.....	132
6.2.1 Эргономические требования.....	132
Рис. 6.2.....	133
6.2.2 Требования к освещению и его расчет.....	133
6.2.3 Требования к микроклимату и воздуху рабочей зоны.....	136
6.2.4. Шум и вибрация.....	137
6.2.5. Техника пожарной безопасности.....	139
7 Технико-экономическое обоснование проекта.....	144

7.1 Определение актуальности и необходимости	144
7.2 Расчет сметы затрат.....	148
7.3 Определение экономической эффективности	150
Заключение.....	151
Список литературы:	153
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	156
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	162
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	165

Перечень сокращений

- АД - астротелевизионный датчик
- БИС - большая интегральная схема
- БКУ - бортовое контрольное устройство
- БЦВМ - бортовая цифровая вычислительная машина
- БЦВС - бортовая цифровая вычислительная система
- ДЗЗ - дистанционное зондирование Земли
- ДУС – датчики угловой скорости
- ЗП - звездный прибор
- КА - космический аппарат
- КП – кадровый перенос
- МПП - многослойная печатная плата
- ОМС - отладочно-моделирующий стенд
- ОМХ - объемно-массовые характеристики
- ОС - оптическая схема
- ПЗУ - постоянное запоминающее устройство
- ПЗС - прибор с зарядовой связью
- ПСК - приборная система координат
- СКД - система координат АД
- СКО - среднеквадратичное отклонение
- ТЗ - техническое задание
- ТЭБ - термоэлектрическая батарея
- ФП - фотоприемник
- ФППЗ - фоточувствительный прибор с переносом заряда
- ЦА - целевая аппаратура
- ЭРИ - электро-радио изделия

Введение

4 октября 1957 года был запущен первый искусственный спутник Земли, и началась космическая эра. С тех пор область использования космической техники для практических нужд и научных исследований постоянно расширялась и продолжает расширяться по сей день. За пять с половиной десятилетий космической эры проектирование и производство космической техники превратилось в самостоятельную отрасль промышленности, в которой работают тысячи специалистов и которая содержит множество технических направлений. Одним из таких направлений является создание оптико-электронных приборов ориентации космического аппарата (КА).

Приборы ориентации и навигации КА являются оптическими устройствами переработки информации, причем объем этой переработки достаточно велик, что приводит к определенным особенностям их проектирования.[12]

В настоящее время сложилось общепризнанное распределение приборов астроориентации на типы. Прежде всего, приборы разделяются по характеру использования их в составе КА — автоматические и визуальные. Существует и другое разделение астроприборов по типам, а именно в зависимости от используемых ими астроориентиров. По этому признаку выделяются три типа приборов — приборы ориентации и навигации по звездам, по Земле, по Солнцу (более кратко — звездные, земные и солнечные датчики).

Целью выполнения данной работы является разработка фоточувствительного тракта звездного прибора (базового астротелевизионного датчика или кратко астродатчика) с использованием в качестве чувствительного элемента ПЗС с кадровым переносом для автономных систем измерения положения КА в пространстве и для систем

коррекции гироскопических инерциальных систем.

Астродатчик (АД) — это бортовой прибор космического аппарата, фиксирующий направление на какую-либо звезду.

АД обеспечивает возможность автономного поиска и обнаружения звезд, их селекцию в поле зрения по совокупности признаков, функции слежения за звездами, измерения и вычисления координат энергетических центров изображений с учетом паспортных параметров каждого АД и выдачу координат нескольких звезд (до 15 по запросу бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС)).

АД или несколько датчиков являются составной частью систем ориентации КА и устанавливаются неподвижно на борту с привязкой к системе координат КА.

АД выполнен в виде составного моноблока, включающего следующие составные части: устройство оптическое (с блендой и объективом), фотоприёмное устройство (с термоохладителем и механизмом юстировки), блок электронный БЭ (с видеотрактом, процессором и интерфейсом), жёсткое основание, электрические соединители.

При выполнении данной работы будет проведен литературный обзор, касающийся истории появления АД, обзора существующих АД и ФППЗ, целесообразности их применения; будет проведена разработка видеотракта АД, будет создан макет АД с выбранным ФППЗ. В дипломный проект также войдут: экономический раздел, включающий технико-экономическое обоснование целесообразности использования разработанного фоточувствительного тракта; раздел по охране труда, включающий обеспечение оптимальных условий труда работника предприятия ФГУП МОКБ «Марс» и обеспечение его безопасности при работе.

1 Приборы ориентации и навигации КА

1.1 Принцип использования астродатчиков для ориентации КА

Одна из наиболее простых схем использования АД представлена на рис. 1.1. Астродатчик выдает направления на звезды с некоторой погрешностью. На борту КА имеется каталог звезд, в котором заданы направления на звезды без погрешности относительно инерциальной системы координат (ИСК). Вначале измеренные звезды подаются на вход алгоритма опознавания, который ставит в соответствие измеренной звезде каталожную звезду. Далее алгоритм расчета ориентации, используя соответствие между визируемыми и каталожными звездами, рассчитывает ориентацию ПСК относительно ИСК. По рассчитанной и требуемой ориентациям алгоритм коррекции ориентации формирует команду в систему управления для перевода системы из рассчитанной ориентации в требуемую.[12]

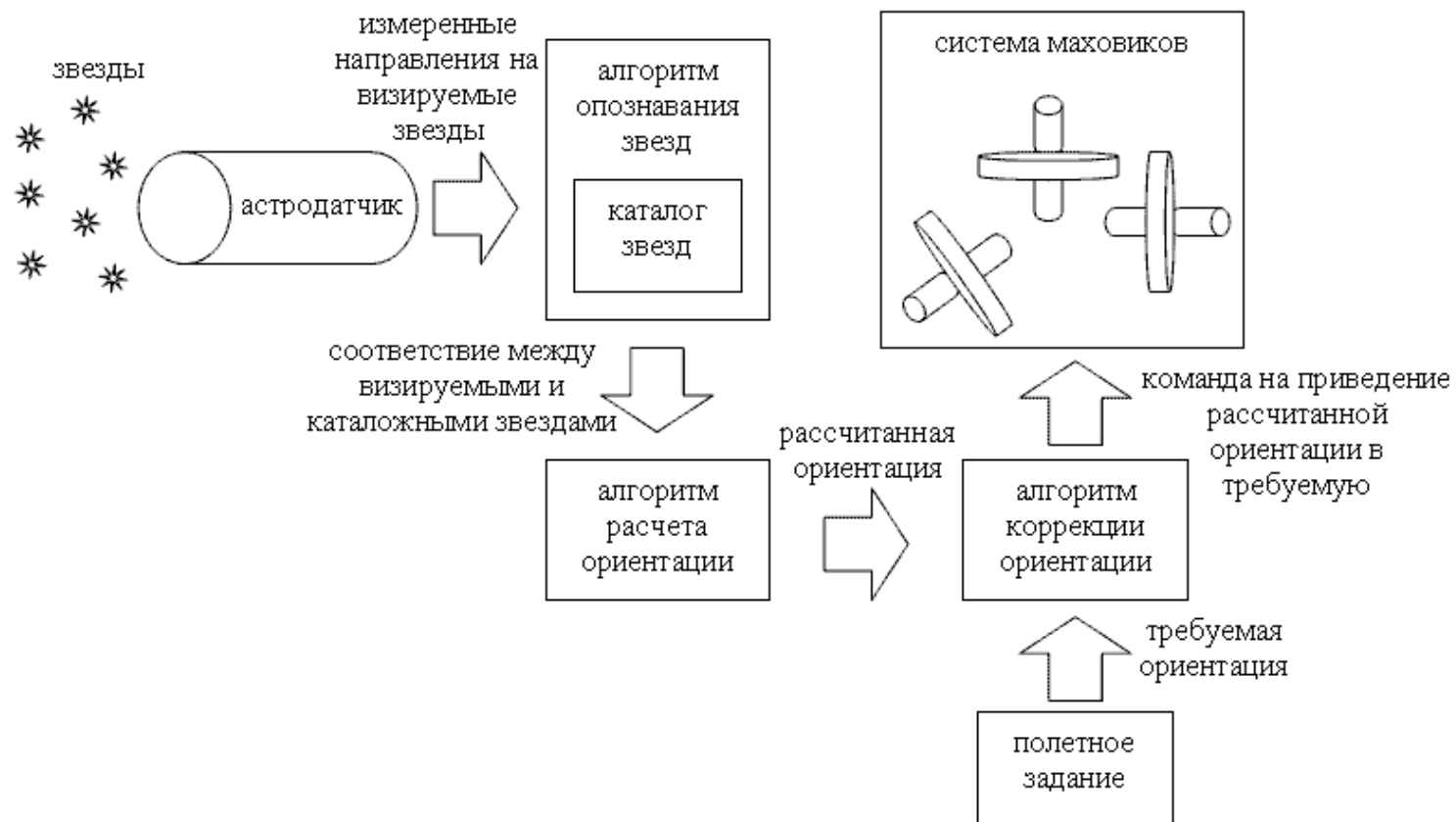


Рис. 1.1. Упрощенная схема использования АД

1.2 История появления звездных приборов

За пять с половиной десятилетий космической эры было разработано несколько десятков разновидностей приборов ориентации и навигации КА, отличающихся назначением, принципами построения, особенностями использования, конструктивными особенностями и т.д.[4]

Первые звездные приборы (звёздные датчики) предназначались для измерения углового положения определенных - самых ярких - звезд. Первоначально применявшиеся фотоприемники (фотоэлементы и фотоэлектронные умножители (ФЭУ)) требовали использования сложных с точки зрения кинематики схем механической модуляции и систем сканирования.

Следующим шагом в развитии ЗД стала электронная модуляция, не устранявшая, однако, необходимость использования высоковольтного напряжения для фотоприемника и, главное, последовательного сканирования поля зрения. Только по мере освоения технологии производства твердотельных и матричных приемников излучения (первоначально на принципах приборов с зарядовой связью (ПЗС)) появилась реальная возможность создания ЗД, одновременно регистрирующих текущее положение группы наиболее ярких звезд, оказавшихся в поле зрения ЗД. Информации, поступающей с одного такого ЗД, оказывается достаточно для определения трехосной ориентации КА в инерциальном пространстве, из неопределенного начального положения.

В 1958 г., когда появилась необходимость управлять ориентацией искусственных спутников Земли в космическом пространстве, по инициативе академика Королева С.П. были начаты работы в области космического приборостроения в ЦКБ №589 (ныне ОАО «НПП «Геофизика-Космос»).

Первые ЗД, созданные на «Геофизике», появились в начале 1960-х годов в составе комплекса автоматических приборов ориентации для полета межпланетных станций к Марсу и Венере. Один из звездных приборов (ЗП)

осуществлял ориентацию КА по Солнцу и ярким звёздам (Канопус и Сириус), имея три степени свободы. Другой прибор использовался в дальнем космосе для ориентации на Землю антенны; он работал по Солнцу и Земле, которая с таких расстояний похожа на яркую звезду.

Приборы типа 125К с 1969 года по 1986 год обеспечивали ориентацию всех автоматических межпланетных станций, направленных к Венере.

В ЗД 155К удалось добиться высокой помехозащищенности благодаря использованию принципа электронного сканирования, реализованного с помощью фотоприемника типа диссектор. Прибор успешно прошел летно-конструкторские испытания в 1975 году на борту орбитальной станции «Салют-4».

В середине 1970-х годов, после решения задачи длительной работы точной механики в открытом космосе, было создано астровизирующее устройство, предназначенное для поиска, захвата астроориентиров и слежения за ними с целью получения информации о положении астроориентиров в связанной с КА системе координат. В этом приборе двухступенной подвес обеспечивал поле обзора в объеме полусферы. В состав прибора входили: оптический блок, электронный блок и светозащитная крышка.

Более 20 лет на российских искусственных спутниках Земли широко использовался прибор ориентации на Полярную звезду, который, в частности, устанавливался на спутники связи, непрерывно работающие на геостационарной орбите в течение нескольких лет. Этот ЗД предназначен для обнаружения и слежения за Полярной звездой с целью измерения ее углового положения в приборной системе координат, связанной с КА. Прибор имеет встроенные средства калибровки для обеспечения высокой точности измерений, в нем предусмотрена селекция помех типа «светящихся частиц». Резервирование обеспечено двойным комплектом электроники. В состав прибора входят оптический блок и электронный блок.

В 1985 году для многоцветного КА «Буран» была разработана

прецизионная астроизмерительная система, в состав которой впервые была включена специализированная цифровая вычислительная машина (СЦВМ). Прибор должен был периодически использоваться для коррекции расчетной базовой инерциальной системы координат КА. Эта система состоит из прибора визирного, прибора электронного и СЦВМ.

Второй созданной на предприятии системой, в составе которой была СЦВМ, стала прецизионная астроизмерительная система. Предполагалось, что этот прибор должен непрерывно в течение сеанса работы выдавать в систему управления (СУ) КА информацию о текущих координатах пяти зарегистрированных в поле обзора астроориентиров. После его включения выполнялся самоконтроль правильности функционирования всех компонентов системы. Затем осуществлялся поиск астроориентира в окрестности ожидаемого положения КА путем сканирования области поиска полем зрения прибора. Положение центра области поиска и ее размер задавались целеуказаниями, поступающими из СУ. После обнаружения астроориентира и его подтверждения прибор переходил в режим слежения за звездой с выдачей в СУ КА непрерывно измеряемых угловых координат звезды в приборной системе координат. Данная система состоит из прибора визирного, прибора электронного и СЦВМ. Изготовленные еще в 1987 году, эти системы успешно эксплуатировались на КА «Аркон-1» в 1997, 2002 и 2003 годах.

Примером современных принципов построения ЗД может служить широкопольный звездный датчик. Прибор предназначен для работы в составе системы ориентации и стабилизации космических аппаратов (КА) длительной эксплуатации. Измеряет угловое положение звезд относительно опорных баз датчика. Изображение звезды формируется на светочувствительной площадке ПЗС-матрицы. Электронный тракт датчика выполнен на современной электронной базе высокой степени интеграции, что обеспечило снижение габаритов, массы и энергопотребления датчика. Вычислитель датчика позволяет наряду с определением координат звезд

решить задачи распознавания зарегистрированных звезд и последующего расчета трехосной ориентации КА относительно геоцентрической системы координат.

Совокупность трех типов автоматических приборов — солнечных датчиков, построителей местной вертикали и звездных датчиков — обеспечивает решение всех задач ориентации КА на орбите ИСЗ, от исходного построения ориентации из неопределенного начального положения до постоянного поддержания с заданной точностью режимов инерциальной или орбитальной ориентации.

С 2007 года на предприятии началась разработка перспективных приборов статического типа, в рамках которой был создан новый звездный датчик (ЗД), предназначенный для работы в составе системы управления ориентацией космического аппарата длительной эксплуатации. ЗД состоит из оптических блоков (ОБ) и общего электронного блока (ЭБ). Количество ОБ от 1 до 6 штук определяется целью миссии КА. Новый звездный датчик измеряет угловое положение звёзд относительно измерительных систем координат ОБ, опознаёт участки звёздного неба и обеспечивает автономное определение ориентации КА в инерциальной геоцентрической системе координат.

1.3 Этапы развития звездных приборов

Развитие космической техники во многом связано с совершенствованием систем управления КА. В связи с высокими и постоянно возрастающими требованиями к точности таких систем, с необходимостью обеспечения автономности их функционирования в качестве датчиков первичной информации используются оптико-электронные приборы - астроприборы. Эти приборы на современных КА могут обеспечивать в составе системы управления решение четырех основных задач — астроориентации, астрокоррекции, астронавигации и определения положения (индикации) осей КА.

Задача астроориентации [13] состоит в том, чтобы по показаниям астроприборов ориентировать КА (или какое-либо устройство на КА, например телескоп, солнечные батареи) в инерциальном пространстве для выполнения того или иного эксперимента, измерения, маневра; при этом астроприборы непосредственно входят в контур управления КА и должны функционировать в течение всего времени поддержания режима ориентации.

В задаче астрокоррекции показания астроприборов используются для коррекции положения осей КА или осей его гироплатформы (реальной или виртуальной, реализованной программными средствами в бортовом компьютере), которые предварительно были соориентированы, но с течением времени их положение изменилось. Астроприборы здесь не входят непосредственно в контур управления системы ориентации КА, а лишь периодически выдают корректирующую информацию. Поэтому время работы этих астроприборов при решении задачи астрокоррекции значительно меньше, чем при решении задачи астроориентации.

В конце 80-х гг. прошлого века начали применяться широкопольные звездные датчики на базе ПЗС-матриц, определяющие параметры ориентации путем сравнения изображения наблюдаемого участка звездного неба с хранящимся в памяти бортового компьютера звездным каталогом.[5]

Пионерами в этой области стали JPL (США), Officine Galileo (Италия), SODERN (Франция) и ИКИ АН СССР в кооперации с предприятием «Карл Цейсс Йена» (ГДР).

Фирма SODERN в 1985 г. начала разработку звездного координатора SED12, основанного на ПЗС-матрице, для русско-французского проекта «Сигма». Конструктивно прибор состоял из двух блоков: оптического блока и блока электроники. Блок электроники имел два канала и мог функционировать с двумя оптическими блоками. Впервые прибор SED12 был установлен и выведен в космос в 1989 г. на советском спутнике «Гранат» и проработал в течение 10 лет до закрытия проекта. В дальнейшем он был использован на спутниках Helios-1, Helios-2 (французские спутники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)), ODIN (шведский спутник), ENVISAT (европейский спутник, изучение окружающей среды).

ИКИ АН СССР и «Карл Цейсс Йена» в середине 1980-х гг. разработали систему «Астро» для космической станции «Мир». Комплекс включал три цифровые телевизионные камеры на базе матричных ПЗС, три электронных блока обработки звездных снимков и общий электронный блок комплекса. Система «Астро» была установлена на станции в 1989 г. и успешно проработала в течение 11 лет вплоть до закрытия проекта. Станция «Мир» была успешно затоплена с использованием показаний системы «Астро».

В настоящее время за рубежом насчитывается более 10 производителей звездных приборов, среди них: SODERN (Франция), Jena-Optronik (Германия), Galileo Avionica (Италия), Ball Aerospace (США), Goodrich (США), Terma (Дания, Германия, Нидерланды, Сингапур, США) и др., которые выпускают более 30 моделей звездных приборов различного типа и назначения).

Одним из путей развития приборов ориентации космических аппаратов (КА) является объединение прибора звездной ориентации и гироскопа. Интеграция этих приборов позволяет улучшить такие показатели системы управления КА как масса, габариты, энергопотребление,

помехозащищенность и точность. [6]

Идея объединения датчика звездной ориентации и датчиков угловой скорости (ДУС) в одном интегрированном приборе зародилась в России в ИКИ РАН в конце 1990-х гг. Предпосылками для этого служили тенденции в развитии приборов звездной ориентации и гироскопии, а также опыт построения систем ориентации ряда КА.

Данный тип приборов получил название «Блок определения координат звезд» (БОКЗ). С середины девяностых годов институтом было изготовлено более 60 приборов БОКЗ (рис. 1.2) в различных модификациях, которыми были оснащены 14 КА. Среди них Международная космическая станция, аппараты серии «Ямал», «БелКА», «Ресурс-ДК».

Еще один российский производитель подобных приборов — московское ОКБ «Марс». С 2005 г. Данное предприятие оснастило приборами ориентации по звездам — АД-1 — пять КА: «Монитор-Э», «КазСат», «Экспресс МД1», «Электро Л», «Спектр Р».

В отличие от приборов БОКЗ, производимых ИКИ РАН, звездные датчики АД-1 (рис. 1.3) производства МОКБ «Марс» не являются автономными. Они используют для обработки данных вычислительные мощности бортовой ЭВМ.



Рис. 1.2. Внешний вид прибора БОКЗ-М
разработки ИКИ РАН

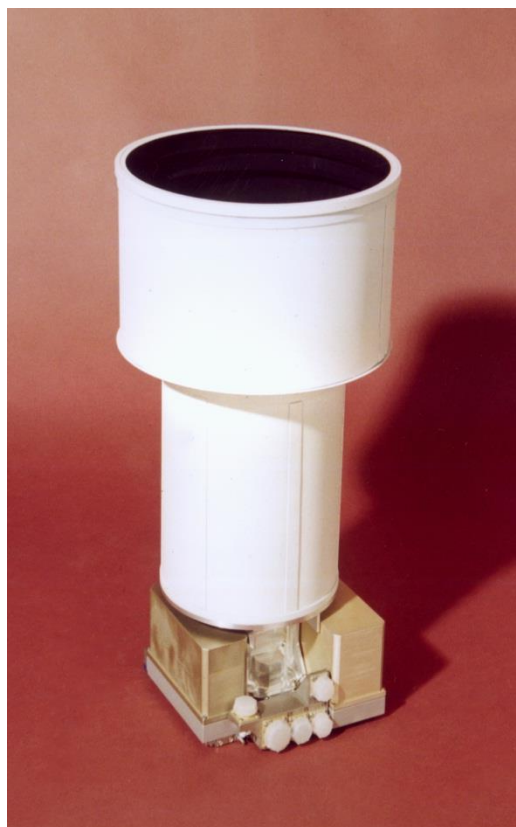


Рис. 1.3. Внешний вид астродатчик АД-1
фирмы МОКБ «МАРС»

Звездные датчики ориентации производства ОАО «НПП Геофизика-Космос»

В прошлом разрабатывало и производило большое количество звездных приборов. В советский период многие космические аппараты оснащались датчиками звезд производства ГП НПО «Геофизика», которое впоследствии было преобразовано в ОАО «НПП Геофизика-Космос». В настоящее время предприятие разрабатывает широкопольные звездные приборы 329К (рис. 1.4), 345К и 348К. Летных испытаний этих приборов не проводилось.



Рис. 1.4. Внешний вид прибора 329К

Звездные датчики ориентации производства фирмы SODERN

Одним из мировых лидеров по производству звездных приборов является французская фирма SODERN. Сегодня она выпускает звездные приборы SED16, SED26, SED36 и HYDRA.

Все эти приборы являются автономными, т. е. способны определять параметры ориентации с помощью собственных вычислительных средств.

В мае 2002 г. прибор SED16 (рис. 1.5) был впервые выведен в космос на космическом аппарате SPOT5. Этот прибор был основан на ПЗС-матрице размером 1024×1024 элемента.

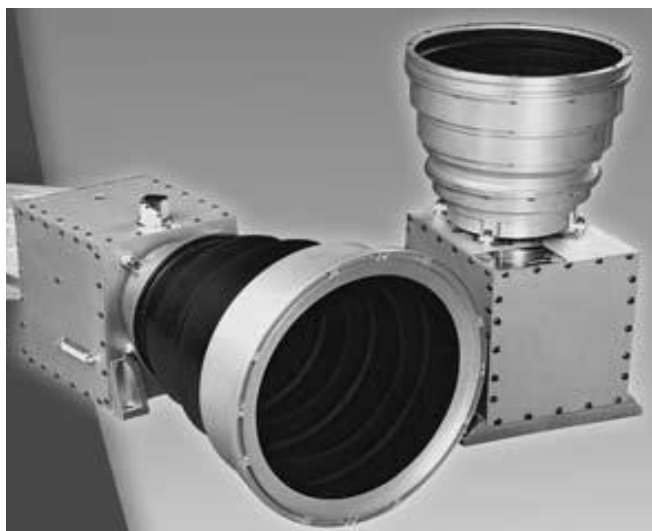


Рис. 1.5. Внешний вид прибора SED16/26

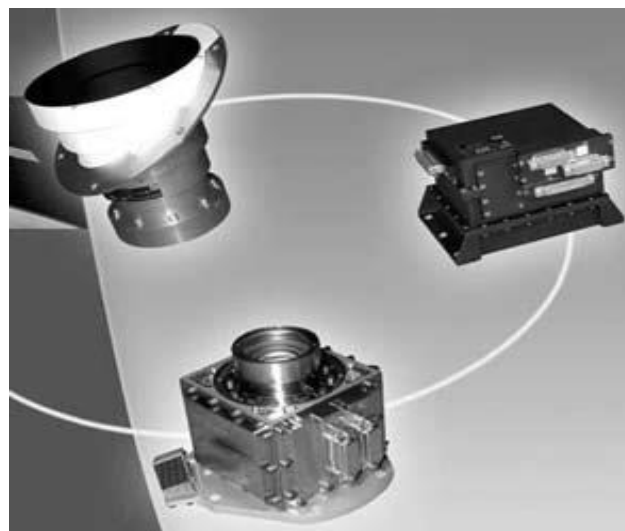


Рис.1.6. Внешний вид прибора SED36

В 2006 г. была завершена разработка звездного прибора SED36 (рис. 1.6). Этот прибор конструктивно выполнен в виде двух блоков: оптического блока и блока электроники. Разработчики пошли на разделение моноблока, стремясь минимизировать механические искажения в оптическом канале, возникающие из-за неравномерности распределения температуры. При этом удалось снизить систематическую ошибку прибора и добиться точности определения направления оптической оси $0,3$ угл.с (σ), вокруг оптической оси 2 угл.с (σ). Но разделение на два блока привело к увеличению массы прибора.

Звездные датчики ориентации производства фирмы Jena-Optronik

Еще одним ведущим мировым производителем является немецкая фирма Jena-Optronik, созданная в ГДР на базе Народного предприятия «Карл Цейсс Йена». Первый звездный прибор, основанный на ПЗС, фирма Jena-Optronik разработала совместно с Институтом космических исследований АН СССР.

Сегодня фирма Jena-Optronik производит три модели звездных приборов: ASTRO 10, ASTRO 15 (рис. 1.7) и ASTRO APS (рис. 1.8). Все приборы являются автономными.



Рис. 1.7. Внешний вид прибора ASTRO15
без бленды



Рис. 1.8. Внешний вид прибора
ASTRO APS

Точностные характеристики прибора ASTRO15 значительно скромнее, чем у прибора SED36 фирмы SODERN. Поэтому ясно, что оценки точности разными производителями неоднозначны. Необычна конструкция прибора. Лапы для крепления расположены в середине корпуса. При таком расположении крепления тепловой поток от ПЗС-матрицы испытывает наименьшее сопротивление.

Прибор ASTRO APS — последняя разработка фирмы Jena-Optronik. Этот звездный датчик основан на КМОП-матрице. Прибор ASTRO APS является одним из самых маленьких по массогабаритным характеристикам.

Звездные датчики ориентации производства фирмы Ball Aerospace

Фирма Ball Aerospace (США), являясь крупным производителем спутников, разрабатывает и производит для них звездные датчики ориентации СТ-602 (рис. 1.9), СТ-631, СТ-632, СТ-633 (рис. 1.10). Среди этих приборов присутствует только один автономный прибор СТ-633 —

остальные для вычисления параметров ориентации используют вычислительные мощности бортового компьютера.



Рис. 1.9. Внешний вид прибора СТ-602



Рис. 1.10. Внешний вид приборов

СТ-631, СТ-632, СТ-633

Серия звездных датчиков СТ-63х разрабатывалась для микроспутников и имеет широкое поле зрения. Масса приборов снижена более чем в два раза по сравнению с предыдущими разработками. Особенностью звездного датчика СТ-632 является работа на больших угловых скоростях — до 72 град/с. Этот звездный прибор применяется на спутниках, которые для стабилизации используют вращение.

Звездные датчики ориентации производства фирмы EMS Technologies

В Канаде разработкой звездных датчиков занимается фирма EMS Technologies. Созданный в 2000 г. звездный прибор CALTRAC (рис. 1.11) использовался в проектах PROTEUS JASON 1, NASA Mars 2001, Genesis Discovery Mission. Прибор является автономным.



Рис. 1.11. Внешний вид прибора CALTRAC

В настоящее время разрабатываются звездные приборы, предназначенные для микроспутников и изготовленные с применением индустриальной элементной базы. Рассмотрим их подробнее.

Звездные датчики ориентации производства фирмы Surrey Satellite Technology Limited (SSTL)

Английская фирма SSTL разрабатывает и производит микроспутники различного назначения. Кроме того, ею разрабатывается большая часть оборудования этих спутников, в том числе и звездные датчики ориентации. Прибор Altair-НВ (рис. 1.12) автономный, состоит из двух блоков: оптического блока и блока электроники. Прибор спроектирован с применением индустриальной элементной базы.

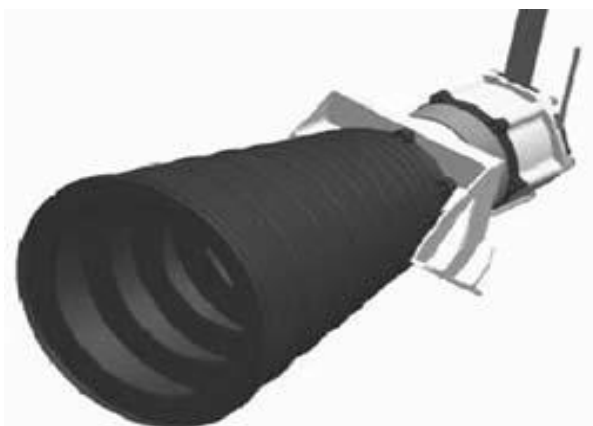


Рис. 1.12. Внешний вид прибора Altair-НВ

Интегрированные приборы

В космическом приборостроении наблюдается тенденция к комплексированию функционально близких приборов. Так, независимо друг от друга, фирмой Draper (США) и ИКИ РАН созданы два интегрированных прибора: Inertial Stellar Compass (ISC) (рис. 1.13) и БОКЗ-МФ (рис. 1.14) соответственно, сочетающих в себе звездный датчик ориентации и гироскоп. Эти функциональные блоки удачно взаимодополняют друг друга, увеличивая надежность выполнения прибором целевой задачи.



Рис. 1.13. Внешний вид прибора ISC



Рис. 1.14. Внешний вид прибора БОКЗ-МФ

Опыт эксплуатации приборов звездной ориентации в космосе показал, что существует ряд нештатных ситуаций, при которых они не могут функционировать, несмотря на высокие технические характеристики. Примерами таких нештатных ситуаций могут быть засветка поля зрения прибора Солнцем или другими естественными и искусственными телами, а также превышение максимальной угловой скорости для данного звездного прибора. Комплексирование звездного датчика с гироскопом позволяет получить самодостаточный прибор, способный определять параметры ориентации во всех возможных ситуациях.

Прибор ISC информацию об угловом движении выдает с гироскопа, а по оптическим измерениям этот гироскоп периодически калибруется.

Точность определения оптической оси прибора составляет 18 угл.с, вокруг оптической оси — 37 угл.с, а точность самого прибора примерно в 10 раз хуже за счет относительно высокого шума микромеханического гироскопа. В период нештатных ситуаций для звездного датчика добавляется лишь ошибка случайного дрейфа гироскопа (дрейф 3,3 град/ч), а если учесть, что нештатные ситуации носят непродолжительный характер — несколько минут, то дрейф гироскопа не вносит существенной ошибки.

Прибор ISC фирмы Draper — единственный в настоящее время интегрированный прибор, который функционирует в космосе. Прибор состоит из двух блоков: оптического блока и блока электроники. Датчики угловой скорости (ДУС) встроены в оптический блок.

В Институте космических исследований создано два интегрированных прибора: БОКЗ-МФ (см. рис. 1.14) и БОКЗ-М60. Прибор БОКЗ-М60 выполнен в конструктиве прибора БОКЗ-М (см. рис. 1.2). В отличие от прибора ISC информация об ориентации выдается по оптическим измерениям, гироскоп постоянно калибруется, а информация с него используется только при нештатных ситуациях, когда работа оптического канала невозможна.

В ИКИ РАН разработка интегрированных приборов определения параметров ориентации стала одним из основных направлений. В настоящее время разрабатывается интегрированный прибор, который сочетает звездный датчик ориентации, гироскоп средней точности и приемо-вычислительное устройство спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Этот прибор по точностным параметрам будет полностью удовлетворять требованиям ДЗЗ.

Первые модификации приборов звездной ориентации БОКЗ создавались в ИКИ РАН с целью периодической астрокоррекции гироскопов, по непрерывным показаниям которых осуществлялось управление ориентацией КА. Астрокорректоры предполагалось использовать в сеансном режиме, от них не требовалась высокая частота обновления информации и

работа при высоких угловых скоростях КА. С этой задачей приборы БОКЗ успешно справлялись на 12 КА, демонстрируя высокие показатели надежности, помехозащищенности и точности. Однако нестабильная работа или отказ giroприборов на КА «Ямал-100», «Ресурс-ДК», «Космос-2410», «Космос-2420» вынуждали разработчиков использовать звездные приборы в контуре прямого управления угловым движением КА непрерывно. Применение астрокорректоров для прямого управления КА требовало увеличения их диапазона рабочей угловой скорости и частоты обновления информации. В тех же направлениях двигалось развитие аналогичных приборов за рубежом, хотя следует заметить, что обычно это шло вразрез с точностью.

Эксплуатация приборов звездной ориентации в контуре прямого управления вместе с ДУС средней точности показала, что благодаря обмену информацией между двумя этими приборами достигается повышение надежности их функционирования, помехозащищенности и точности. Так, гироскоп требует астрокоррекции в любом случае, причем, если прибор звездной ориентации работает непрерывно, то правильно вести астрокоррекцию также непрерывно. По данным от гироскопа может быть сформирована априорная информация для звездного прибора, которая требуется после засветки оптической системы Солнцем или при угловом ускорении КА. Кроме того, наиболее точное определение кинематики вращения КА достигается благодаря совместной фильтрации «сырых» измерений с датчиков. Следует отметить, что при использовании на борту высокоточной БИНС (бесплатформенная инерциальная навигационная система) перечисленные задачи должны решаться в бортовой вычислительной машине (БВМ). Однако при использовании ДУС средней точности, габаритные размеры которых соизмеримы с размерами оптической части прибора звездной ориентации, рационально использовать интеграционный подход и встраивать ДУСы в состав звездного прибора. При этом удастся существенно улучшить показатели массы, габаритов и

энергопотребления аппаратуры благодаря уменьшению кабельной сети, упрощению интерфейсных элементов, использованию единой конструкции, источника питания и вычислительной электроники. Обработка «сырой» оптической и инерциальной информации в интегрированном приборе может вестись в одном программном обеспечении, что значительно упрощает решение перечисленных выше задач.

Немаловажным достоинством интегрированного прибора является жесткая связь систем координат оптической и инерциальной систем, которая может быть с высокой точностью определена при наземной калибровке. Заметим, что при конструктивно разделенном звездном приборе и гироскопе связь их систем координат с достаточной точностью может быть определена только в космическом полете. Более того, даже после полетной калибровки температурные деформации конструкции КА могут приводить к существенным систематическим ошибкам при определении кинематических параметров. Такие эффекты минимизированы в интегрированном приборе. Компактность интегрированного прибора существенно расширяет возможности его отработки и отладки при наземных испытаниях, что также позитивно сказывается на надежности решения им целевой задачи в реальном космическом полете.

Учитывая все перечисленные достоинства интеграционного подхода, в ИКИ РАН с 2003 по 2008 годы велась работа по изучению различных ДУС и их внедрению в состав звездных приборов БОКЗ. Требования при выборе ДУС предъявлялись, в первую очередь, к их габаритам, которые не должны были превышать размеров оптической части звездного прибора. Таким требованиям удовлетворяют ДУС, выполненные на основе волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), твердотельно-волнового гироскопа (ТВГ) и технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Параллельно с попытками построения кооперации в России ИКИ РАН закупал образцы зарубежных низкоточных МЭМС-датчиков, которые появились на рынке приборов несколько лет назад. В то время МЭМС-технология не

рассматривалась серьезно в вопросах космической ориентации, однако за прошедший период количество фирм-производителей этих элементов увеличилось на порядок, а сами ДУС были доведены до среднего класса точности. При этом работы, проведенные ИКИ РАН с низкоточными ДУС, дали определенные результаты. Низкоточные ДУС были интегрированы в состав приборов звездной ориентации БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60, разработаны методики их калибровки и отработки, создана удобная стендовая база.

При встраивании МЭМС-ДУС в состав приборов звездной ориентации масса этих приборов увеличилась всего на 30 г, а энергопотребление — на 0,5 Вт, при этом прибор стал полностью автономным.

В настоящее время в ИКИ РАН ведется разработка нового поколения интегрированных приборов, чьи ДУС в 20 раз точнее образцов, использованных в приборах БОКЗ-МФ и БОКЗ-М60. При использовании этих ДУС прибор становится равноточным относительно оптических и инерциальных измерений. При этом повышается эффективность совместной фильтрации измерений с обоих каналов и прогнозирования кинематических параметров движения КА. Совместная обработка показаний прибора, во-первых, повышает точность измерений, а во-вторых, позволяет формировать выходную информацию с частотой и задержками по времени, достаточными для прямого управления КА. Кроме того, новый прибор будет содержать приемно-вычислительное устройство сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС/GPS, что позволит вычислять все параметры орбитального движения КА. Такой прибор способен заменить кинематический контур КА, обладая при этом массой до 5 кг, что, конечно, выгодно с точки зрения показателей габаритно-массовых, надежности и стоимости.

1.4. Тенденции развития современных звездных приборов

К современным приборам ориентации и навигации КА предъявляется комплекс достаточно сложных технических требований, основными из которых являются:

- высокая точность угловых измерений;
- необходимая чувствительность — способность работать по излучению тех астроориентиров, которые обеспечивают проведение требуемых измерений;
- помехоустойчивость — устойчивость к воздействию различных помеховых излучений как естественного, так и искусственного происхождения;
- функционирование при различных движениях КА (работа на подвижном основании) со значительными угловыми скоростями и ускорениями;
- выполнение набора сложных функций — поиск и обнаружение астроориентиров, их селекция на фоне помех, слежение за астроориентирами, точное измерение угловых координат; особо здесь следует отметить функции распознавания групп звезд и определения трехосной ориентации, требующие больших интеллектуальных ресурсов;
- работоспособность в условиях воздействия факторов космического пространства (глубокий вакуум, солнечная радиация, ионизирующие излучения, газопылевое окружение) в течение длительного времени (до 10–15 лет и более);
- воздействие различных факторов со стороны космического аппарата — механических, тепловых, электрических и др.

Все эти требования должны учитываться при проектировании современных приборов ориентации и навигации КА.

Современная элементная база и новые фотоприемники типа ПЗС

позволяют создавать астросистемы с новыми техническими характеристиками. Уменьшились габариты астродатчиков. Их веса снизились в десятки раз. Требуемая точность к ориентации, рассчитываемой по звездам, возросла в десятки (иногда и сотни) раз. Ранее расчет ориентации КА по звездам осуществлялся на Земле по телеметрии от астросистемы. В настоящее время вычислительные мощности БЦВС КА позволяют обрабатывать информацию от астросистемы и рассчитывать по ней ориентацию непосредственно на борту КА.

Основные характеристики астродатчика (такие как чувствительность, точность измерения координат) являются комплексными и определяются совокупностью параметров, в том числе, количеством визируемых звезд, их расположением в поле зрения АД. Например, для увеличения числа визируемых звезд необходимо увеличение чувствительности. При одной и той же погрешности измерения координат звезд увеличение числа визируемых звезд приводит к уменьшению погрешности ориентации, рассчитанной по звездам. Или увеличивая число звезд, можно снижать требования по точности измерения координат звезд. Для выявления тенденций разработки звездных датчиков целесообразно провести сравнительный анализ существующих астродатчиков. В табл. 1.1 приведен перечень и основные характеристики некоторых современных астродатчиков.[10]

Рассмотрим основные характеристики современных приборов ориентации по звездам отечественного и зарубежного производства.

Таблица 1.1

Характеристики некоторых современных приборов ориентации по звездам

Прибор	Масса, кг	Потребляем ая мощность, Вт	Точность определения ориентации, σх,у/σх,	Максимальная угловая скорость, °/С	Частота обновления информации, Гц	Поле зрения, град	Число элементов матрицы	Ресурс, час
<i>АД-1М</i> <i>МОКБ «Марс»</i>	2,5	не более 13	1,1/3,0(*)	10	Не менее 5	12 x 12	ПЗС 512 x 512	Не менее 45 000
<i>БОКЗ-МЗ</i> <i>ИКИ РАН</i>	1,6	8	5/12	4	1 (4)	18 x 18	ПЗС 512 x 512	Не менее 20 000
<i>ASF 45\40</i> <i>ОАО «Пеленг»</i>	2,45	10	1,4/10 (ω=0,067°/С)	3	12	37,6	КМОП 2048 x 2048	80 000
<i>348К «НПП</i> <i>«Геофизика-Космос»</i>	3,7	11,5	11	1	5	15 x 15	КМОП 1024 x 1024	144 000
<i>SED26</i> <i>SODERN (Франция)</i>	3,3	Не более 12,5	1/5	20	10	25 x 25	ПЗС 1024 x 1024	Не ограничен в пределах САС
<i>HYDRA</i> <i>SODERN (Франция)</i>	4,2	12	3	10	30	23 x 23	КМОП 1024 x 1024	Не ограничен в пределах САС
<i>Altair-НВ Star Tracker</i> <i>SSTL</i> <i>(Великобритания)</i>	1,7	3	5/17	0,5	1	16 x 11	ПЗС	50 000
<i>ASTRO APS Jena-</i> <i>Optronik (Германия)</i>	1,8	9	2/15	5	10	20 x 20	КМОП 1024 x 1024	> 18 лет

* - Точность определения параметров ориентации (σ) при совместной обработке информации двух АД-1М в установившемся режиме фильтрации/

Сравнивая приборы отечественного производства с их зарубежными аналогами можно выделить отставание как по весовым и энергетическим характеристикам, так и по точностным, частотным параметрам и угловой скорости. В лидеры по всем характеристикам выбиваются приборы производства компании SODERN (Франция), опережая даже американские и немецкие аналоги. Явными отличиями французских приборов являются огромный даже по сравнению с немецкими ресурс, широкое поле зрения и возможность обработки информации при больших угловых скоростях вращения КА, что сглаживает их отставание по весу и потребляемой мощности.

Отечественные приборы в сравнении с зарубежными в большинстве своём обладают большей массой и энергопотреблением, а также не всегда являются автономными, чем резко сдают свои позиции перед конкурентами. Также отечественная продукция обладает в разы меньшим ресурсом. Общее отставание обусловлено слаборазвитой элементной базой.

Типовая функциональная схема перспективного звездного датчика строится на основе матричного фотоприемника с использованием микропроцессора для управления и обработки информации (при частоте обновления информации единицы герц), что позволяет легко модифицировать датчик для использования в различных типах КА методом изменения их программного обеспечения. При этом обычно отсутствуют подвижные оптико-механические элементы. В части достижимых параметров чувствительности и точности, а также алгоритмов управления и обработки информации, имеет место приблизительно сравнимый уровень астродатчиков, используемых для ориентации КА.

Основной тенденцией в разработке звездных датчиков является:

- обеспечение существенно улучшенных объемно-массовых характеристик,

- увеличение ресурса работы приборов до 15 лет;
- увеличение надежности и стойкости к воздействию космического ионизирующего излучения, тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетичных протонов;
- повышение точности измерения приборов до 0,1 — 1 угл. сек.;
- увеличение частоты съема измерительной информации с прибора (не менее 10 Гц) и допустимой угловой скорости вращения КА (до 10-20 град/сек);
- использование КМОП матриц с технологией Active Pixel Sensors (APS);
- комплексирование гироскопа и звездного датчика с применением методов математической обработки измерений ЗД для повышения точности при выполнении астрокоррекции;
- снижение стоимости при сохранении высоких основных технических характеристик точности, чувствительности и помехозащищенности.

Для обеспечения указанной тенденции усовершенствование астродатчиков ведется по следующим основным направлениям:

- расширение функциональных возможностей звездных датчиков, прежде всего, за счет реализации возможности визирования по группе звезд, что позволяет проводить автономную ориентацию КА по трем осям по измерениям звездного датчика;
- по разработке алгоритмов управления и обработки информации, включая методы селекции звезд;
- снижение программных затрат и требований к производительности вычислителя, сокращение времени обработки информации;
- увеличение надежности аппаратуры, обусловленное требованием увеличения срока активного существования КА. Значительную роль в обеспечении надежности играет резервирование.

Техническое задание на разработку фоточувствительного тракта звездного прибора с улучшенными техническими характеристиками

Назначение:

Фоточувствительный тракт АД предназначен для информационного обеспечения звёздного прибора.

Цель:

Разработать фоточувствительный тракт на основе матричного фотоприемника, имеющий следующие основные характеристики:

- Чувствительность:
обнаружение звезд до $m_a = 6,0$ звездной величины
- Поле зрения при заимствованных объективе «Лицей» и бленде, обеспечивающих допустимый угол засветки от Солнца до 40° : не менее $2W = 12^\circ \times 12^\circ$
- Точность определения координат α и β (проекции вектора направления на звезду относительно нормали к посадочной плоскости звездного прибора) — не менее $20''$
- Быстродействие (по сравнению с аналогом) должно быть улучшено на порядок — не менее 5 Гц
- Число одновременно измеряемых звезд не менее 15

Требования к конструкции

Фоточувствительный тракт АД должен удовлетворять конструктивно-техническим требованиям, приведенным в ГОСТ В20.39.301-85 и в настоящем ТЗ:

- Габариты не должны превышать 180 x 180 x 90 мм.
- Масса должна быть не более 2 кг (без бленды и объектива).
- Регулировка взаимного положения объектива и фоточувствительной

поверхности матрицы (по результатам обмера ее реального положения) должна осуществляться юстировочным элементом, расположенным между основанием и ФППЗ.

- Подключение фоточувствительной матрицы к электронным схемам должно обеспечиваться разъемным электрическим соединением собственной разработки с помощью однорядных гнезд, вмонтированных в крепежную оправу.
- Должен быть предусмотрен эффективный теплоотвод с основания АД на посадочное место, а также с термоэлектронного охладителя фоточувствительной матрицы, бленды и электронных блоков на само основание.

Условия изготовления плат фоточувствительного тракта.

а) Нормальные климатические условия:

- температура воздуха от +15°C до +35°C;
- атмосферное давление от 8,4x10⁴ до 10,7x10⁴ Па (от 630 до 800 мм рт.ст.);
- относительная влажность воздуха от 45% до 80 % при температуре ±20°C;

б) Освещенность: общая – 300 лк, местная – 750 лк;

в) Электропитание:

- переменным током напряжением 220 В частоты 50 Гц;
- постоянным током напряжением (27,00±1,35)В;

г) Меры защиты от статического электричества по ГОСТ 19005-81 и ОСТ 92-1615-74;

д) Чистота воздуха – не хуже уровня класса 8 по ГСТ 14644-1-2002.

Постановка задачи дипломного проекта

При разработке фоточувствительного тракта АД ставятся следующие задачи:

1. Применение специального фоточувствительного прибора с переносом заряда (ФППЗ), имеющего следующие необходимые для АД свойства:

- высокое качество изображения;
- высокая чувствительность;
- большое число включений;
- большое быстродействие;
- минимальные затраты времени на вывод неинформационных строк и элементов ФППЗ;
- минимальная потребляемая мощность ТЭБ.

Для обеспечения возможности наиболее полной реализации высоких информационных свойств приборов с зарядовой связью (ПЗС) с кадровым переносом (КП), съема информации ПЗС с КП, управления ПЗС с КП и обработку информации в необходимо высоком темпе (от 500 кГц до нескольких МГц) и обеспечения возможности сведения к минимуму объема аппаратной части электроники АД необходимо применение высокопроизводительного сигнального процессора в БОС.

2. Применение высококачественной оптической системы (модули бленды и объектива), обеспечивающей следующие необходимые для АД свойства:

- малый кружок рассеяния;
- высокая стабильность кружка рассеяния в пределах углового поля зрения объектива;
- малое значение фоновой засветки и градиента фона в фокальной плоскости.

3. Применение перспективной элементной базы, обеспечивающей возможность достижения требуемых высоких характеристик АД, в том числе, по быстродействию, энергопотреблению, при минимальных

затратах по объемно-массовым характеристикам (ОМХ) и по срокам и стоимости создания.

4. Обеспечение минимальной стоимости разработки и изготовления.

2 Принципы построения и работы астродатчика

В данном разделе изложены основные принципы построения АД, предназначенного для автономного поиска, обнаружения и селекции звезд в поле зрения, измерения углового положения выделенных изображений в приборной системе координат, связанной с его посадочным местом и циклической выдачи измерительной и телеметрической информации в систему управления (СУ).[12]

2.1 Принцип действия АД

Астродатчик построен по типу угломерного устройства, состоящего из цифровой оптико-электронной камеры (объектив и фоточувствительный элемент на базе фоточувствительного прибора с зарядовой связью) с процессором.

Функционирование астродатчика состоит в следующем.

Объектив формирует на двухкоординатном ФП изображение участка звездного неба. ФПУ преобразует падающий поток излучения в электрический сигнал, который проходит усиление, аналогоцифровое преобразование, предварительную обработку, фильтрацию и записывается в буферное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), регистрируя информацию о звездах данного участка небесной сферы и их положение относительно системы координат ФПУ. Последующая обработка в процессоре исключает неинформативные участки, слабые звезды, ограничивает количество звезд заданным максимумом, вычисляет по выбранным изображениям звезд их координаты на ФПУ и, используя конструктивные параметры АД, пересчитывает координаты звезд в направляющие углы линий визирования звезд в приборной системе координат АД, материализуемой базовыми поверхностями основания АД. Решение задачи астроориентации КА реализуется в БЦВС БКУ, использующей каталог звезд, адаптированный под фотометрическую систему

АД, и алгоритм распознавания звезд.

2.2 Состав и структурная схема АД

Состав и структурная схема АД приведены на рис. 2.1.

В состав астродатчика входят:

- объектив оптического устройства с встроенными контрольными излучателями точек;
- бленда оптического устройства светозащитная;
- светозащитная шторка;
- прибор ФППЗ;
- блок электронный;
- программное обеспечение;
- комплект монтажных частей.

Модуль объектива включает в себя объектив, узел коллиматоров (точечных изображений и узел фоновой подсветки).

Модуль бленды обеспечивает необходимое ослабление от боковой засветки Солнцем. В состав модуля бленды включена защитная крышка с механизмом открывания, концевыми выключателями для индикации положения крышки и светозащитный затвор (шторка) с концевыми выключателями.

Через узел точной юстировки модуль объектива сопряжен с модулем ФПУ.

Модуль ФПУ состоит из следующих частей:

- фоточувствительной матрицы;
- герметичного газонаполненного корпуса;
- входного оптического окна;
- термоэлектрической батареи (ТЭБ);
- датчика температуры.

В состав модуля электроники входят следующие блоки:

- блок управления ФППЗ (БУФ);

- блок обработки сигнала (БОС);
- блок питания (БП).

В состав блока электронного БЭ входят:

- основание;
- устройство формирования каналов астродатчика (УФК АД);
- плата коммутационная (ПК);
- устройство питания 1 (УП1);
- устройство питания 2 (УП2);
- плата соединительная ПС;
- устройство обработки сигналов (УОС);
- устройство управления ФППЗ модифицированное (УУФМ);
- устройство аналоговое модифицированное (УАМ);
- устройство согласования и фильтрации модифицированное (УСФМ).

Основные функции модуля электроники:

- формирование сигналов управления для обеспечения работы ФППЗ;
- считывание, усиление, предварительная аналоговая обработка, аналого-цифровое преобразование и цифровая обработка информации ФППЗ;
- управление светодиодами узла коллиматоров и подсветки;
- контроль температуры ФППЗ и посадочного места АД;
- прием из БВО меток времени 1 Гц и временная привязка моментов измерения координат звезд;
- формирование выходной, телеметрической и служебной информации.

Основные функциональные связи между модулями и электронными блоками представлены на рис. 2.1.

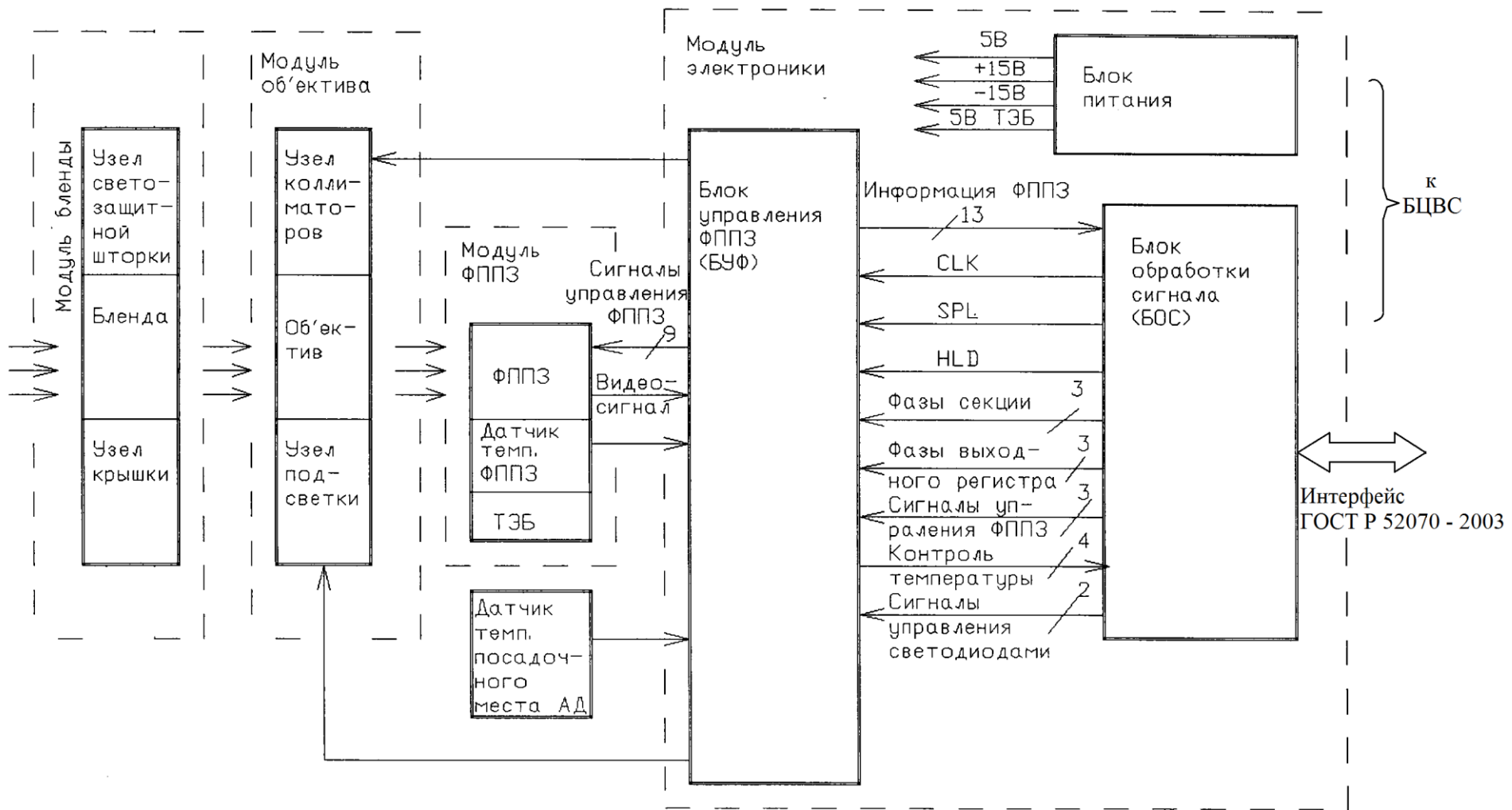


Рис. 2.1 – Структурная схема АД

2.3 Функциональная схема астродатчика

Функциональная схема астродатчика приведена на рисунке 2.2. [12]

АД включает в себя несколько функциональных трактов, краткая характеристика которых приведена ниже:

– видеотракт

Состоит из объектива, бленды оптического устройства, устройств светозащитной шторки (СЗШ) и ФПУ. Видеотракт обеспечивает высококачественную проекцию на чувствительный слой ФПУ участка звёздной сферы в пределах поля зрения, защиту ФПУ от боковых засветок и прямого попадания солнечного излучения, а также приём разовых команд (РК) для управления механизмом управления СЗШ;

– устройство управления ФПУ

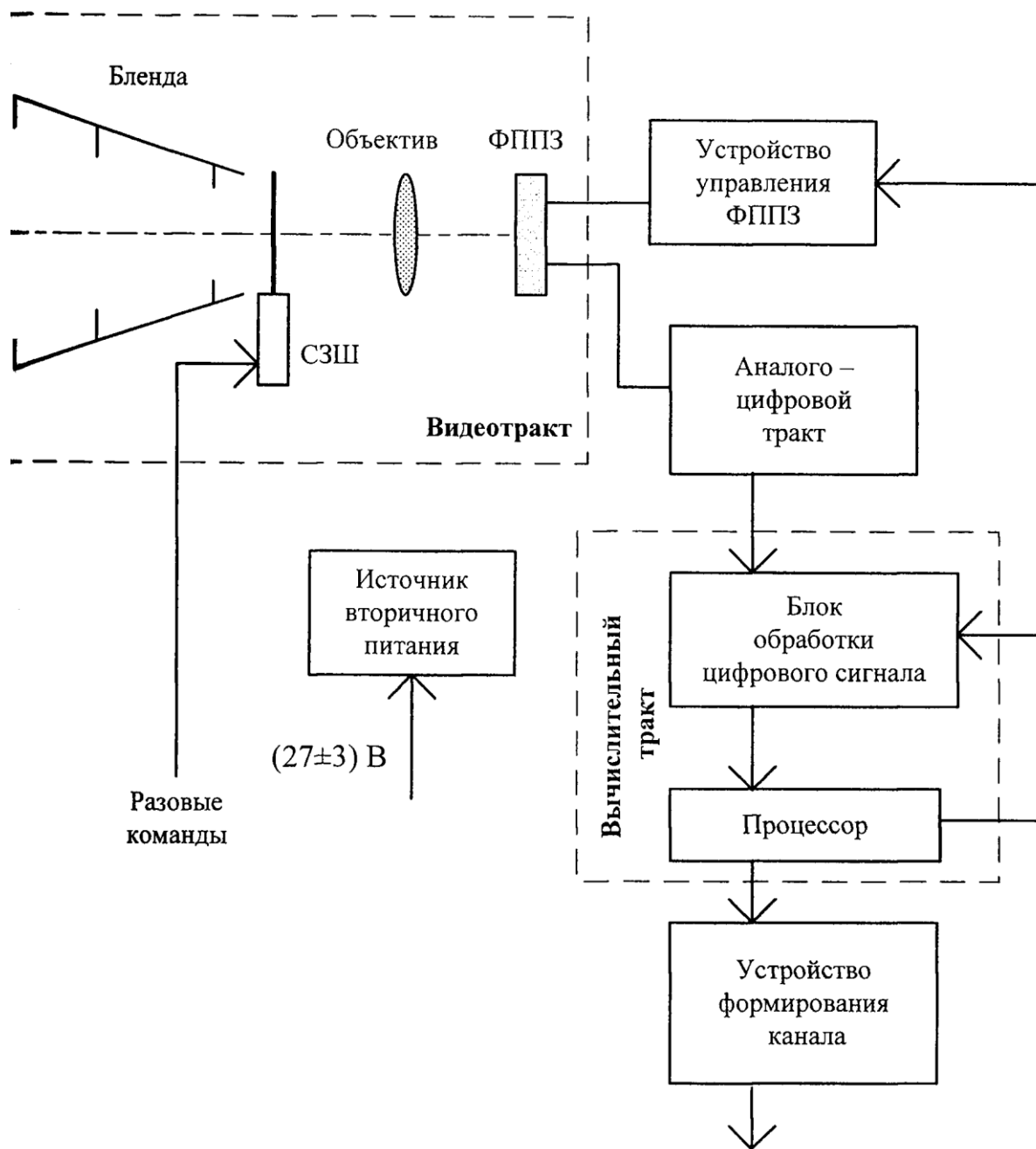
Выполнено на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), реконфигурация которой осуществляется с помощью последовательного репрограммируемого постоянного запоминающего устройства (РПЗУ) и программируемых формирователей уровней сигналов. Устройство обеспечивает циклограмму работы и параметры импульсных и постоянных сигналов на выводах ФПУ в различных режимах работы астродатчика;

– аналого-цифровой тракт

Состоит из видеоусилителя с программируемым коэффициентом усиления, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), порогового устройства, реализованного в ПЛИС и буферного ОЗУ.

Тракт обеспечивает усиление аналогового видеосигнала с ФПУ, преобразование его с частотой 5 МГц в цифровой 12-разрядный код и первичную обработку видеоинформации (режим "Поиск"), с целью сжатия её для последующей вторичной обработки в вычислительном тракте (режим "Измерение").

Режим «Поиск» включает в себя формирование непрерывных последовательностей, превышающих вычисляемый динамический порог, и запись их в ОЗУ.



Интерфейс согласно
ГОСТ Р 52070-2003

Рис. 2.2 – Функциональная схема АД

В режиме "Измерение" формируются зоны 16x16 пикселей, принадлежащих обнаруженным в режиме "Поиска" звёздным изображениям,

с трансляцией реальных значений энергий каждого пикселя;

– вычислительный тракт

Тракт обеспечивает вторичную обработку видеоинформации ФПУ, управление всем вычислительным процессом в различных режимах астродатчика, контроль входящих в астродатчик устройств, контроль достоверности передаваемой информации, подготовку массивов измерительной, телеметрической и диагностической информации для БЦВС.

– устройство формирования канала

Управляется процессором. Обеспечивает обмен информацией АД с БЦВС по резервированной магистрали в соответствии с ГОСТ Р 52070-2003.

– вторичный источник питания

Содержит блок питания, гальванически развязанный от бортовой сети, в составе преобразователей постоянного напряжения и фильтров по первичной и вторичной цепям. Блок обеспечивает питание устройств, входящих в АД, общей потребляемой мощностью не более 15 Вт.

– технологические цепи

На технологический соединитель ХТ выведены цепи видеосигнала с ФПУ и контроля положения светозащитной шторки. Обеспечивается загрузка программного обеспечения в АД и подключение к видеоконтрольному устройству для визуализации чувствительной области ПЗС.

2.4 Конструкция астродатчиков с фотоприемником типа ПЗС

Рассмотрим типовую конструкцию ныне используемых астродатчиков с фотоприемником типа ПЗС на примере астродатчика АД-1 производства ФГУП МОКБ «МАРС».[3]

Астродатчик АД-1 осуществляет автономный поиск звезд в поле зрения, слежение за звездами, измерение положения выделенных изображений в приборной системе координат, связанной с посадочным местом АД-1, и выдачу с циклом 2 с в бортовую цифровую вычислительную систему (БЦВС) информации о координатах и яркостях 15 самых ярких звезд. Конструктивно АД-1 выполнен в виде моноблока и состоит из следующих основных модулей:

- оптическое устройство;
- фоточувствительный прибор с переносом заряда;
- электронный блок,
- основание,
- электрические соединители.

Основные характеристики АД-1 представлены в табл. 2.1. Внешний вид АД-1 представлен в Приложении 1 на рис. 1.

Таблица 2.1

Основные характеристики астродатчика АД-1

Характеристика	Значение
угловое поле зрения, град	13 x 13
количество видимых звезд на небесной сфере при угле до Солнца 40°	5000
максимальное количество одновременно отслеживаемых звезд	до 15
частота смены информации, Гц	0,5
погрешность измерения положения звезд, угл. мин.	не более 1
потребляемая мощность, Вт	15
Масса, кг	3,65
Габариты, мм	235 x 423

а). Оптическое устройство

Состоит из объектива с двумя встроенными имитаторами звёзд и бленды с СЗШ. Характеристики объектива представлены в табл. 2.2. Объектив обеспечивает проекцию на чувствительный слой фотоприёмника участка звёздной сферы в пределах поля зрения. Внешний вид объектива «Лицей» и его оптическая схема представлены в Приложении 1 на рис. 2 и 3.

Таблица 2.2

Характеристики объектива астродатчика АД-1

Характеристика	Значение
фокусное расстояние	52 мм
диаметр входного зрачка	25,6 мм
поле зрения объектива	18° 14'
габаритные размеры	∅ 28×57 мм
масса	350 г

Бленда предназначена для защиты фотоприёмника от боковых засветок Солнцем, Луной и элементами конструкции КА под предельным (минимальным) углом 40^0 к оптической оси АД. Фотография бленды представлена в Приложении 1 на рис. 4.

На бленде установлен узел многоцветной светозащитной шторки с кронштейном. Шторка предназначена для защиты объектива от загрязнения и прямой засветки Солнцем. Внешний вид шторки представлен в Приложении 1 на рис. 5.

б). Фоточувствительный прибор с переносом заряда (ФППЗ)

Выполнен на основе ПЗС матрицы (прибор с зарядовой связью). Охлаждение матрицы осуществляется с помощью встроенной в ФППЗ термоэлектрической батареи (ТЭБ). Характеристики ФППЗ представлены в табл. 2.3. Внешний вид ФППЗ представлен в Приложении 1 на рис. 6.

Таблица 2.3

Характеристики ФППЗ астродатчика АД-1

Характеристика	Значение
число элементов (пикселей) секции накопления	512 × 512
размер элемента	23 × 23 мкм
масса	60 г

в.) Электронный блок

Включает в себя:

- устройство управления ФППЗ, выполненное на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС);
- блок обработки сигналов;
- блок питания;
- электрические соединители.

Аналогово-цифровой тракт электронного блока обеспечивает усиление аналогового видеосигнала с ФППЗ, преобразование его в цифровой код и первичную обработку видеоинформации, с целью сжатия её для последующей вторичной обработки в вычислительном тракте.

Вычислительный тракт состоит из процессора Intel 80С196КС, ПЛИС, ОЗУ, ПЗУ для хранения базовой операционной системы (БОС), РПЗУ для записи функционального программного обеспечения (ФПО) и генератора на 20 МГц.

Блок питания обеспечивает питание устройств, входящих в АД, общей потребляемой мощностью не более 15 Вт следующими номиналами: ± 5 В, ± 15 В, 30 В. Электронный блок обеспечивает обмен информацией АД с БЦВС по резервированной магистрали.

На корпусе блока электронного БЭ расположены три электрических соединителя: XI– X3 и ХТ. Для подключения прибора к БСУ КА служат электрические соединители: XI, X2. Электрический соединитель X3 служит для управления механизмами светозащитной шторки и контрольными излучателями точки устройства оптического. На электрический соединитель ХТ выведены технологические цепи прибора, служащие для его контроля при изготовлении.

Внешний вид электронного блока с объективом представлен в Приложении 1 на рис. 7.

Основание астродатчика представляет собой монолитную конструкцию, на которой крепятся основные его модули:

- объектив;
- бленда;
- ФПУ;
- блок электронный БЭ.

Основание имеет три установочные базы:

- посадочная плоскость астродатчика, перпендикулярная визирной линии объектива на центр поля зрения фоточувствительной секции ФППЗ;
- посадочная плоскость для установки объектива, бленды и ФППЗ (через юстировочный элемент);
- основная плоскость базовых упоров, параллельная линии, соединяющей оси штифтов ФППЗ.

В БЦВС из АД-1 передаются измеренные координаты изображений звезд относительно приборной системы координат астродатчика. Приборная система координат (ПСК) $OXYZ$ АД-1 связана с базовыми установочными поверхностями на посадочном месте АД-1. Оси ПСК имеют следующие направления:

- ось Z перпендикулярна посадочной плоскости АД-1 и направлена в сторону пространства объектов;
- ось X параллельна посадочной плоскости и перпендикулярна линии базовых упоров на основании АД-1;
- ось Y дополняет систему координат до правой.

На рис. 2.4.1 показано задание направления на объект визирования относительно ПСК АД-1.

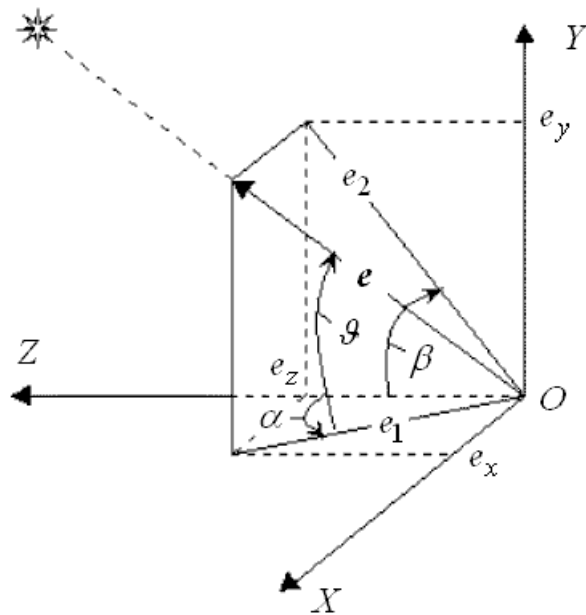


Рис. 2.3. Задание направления на объект визирования относительно ПСК АД

На рис. 2.3 также введены следующие обозначения:

- e_x , e_y , e_z - проекции вектора e на оси ПСК;
- ϑ - угол между e_1 и e . Имеет знак e_y .

Высокий уровень технических характеристик звездных датчиков (точности, чувствительности) обуславливает необходимость разработки соответствующего его испытательного оборудования, которое само по себе является уникальным, технически сложным и требует больших материальных и финансовых затрат.

Точность астродатчика АД-1 проверяется на точностном стенде, фотография которого представлена в Приложении 2.

В Приложении 2 представлена фотография стенда проверки матрицы астродатчика АД-1.

Фотография стенда проверки электроники астродатчика АД-1 представлена в Приложении 2.

Конструкция основания астродатчика обеспечивает эффективный теплоотвод от узлов астродатчика на его посадочное место, при диапазоне температур посадочного места астродатчика.

2.5 Принцип работы астродатчиков с фотоприемником типа ПЗС

Рассмотрим принцип работы астродатчиков с фотоприемником типа ПЗС на примере астродатчика АД-1 предприятия МОКБ «МАРС».[3]

Изображение визируемой звезды формируется объективом в плоскости светочувствительных элементов матрицы ФППЗ, установленной вблизи фокальной плоскости объектива с некоторым смещением относительно этой плоскости, так чтобы световой поток от звезды оказался дефокусированным и занял несколько элементов матрицы ФППЗ. Фотон света, попадая на кремниевую подложку матрицы ФППЗ, генерирует пару электрон-дырка. Система электродов матрицы обеспечивает создание в кристалле кремния потенциальных ям, в которых скапливаются генерируемые электроны, образуя зарядовые пакеты. В процессе считывания зарядовые пакеты переносятся системой электродов матрицы к считывающему устройству матрицы, где преобразуются к напряжению и усиливаются по току. В следующем усилителе с настраиваемым коэффициентом усиления, расположенном вне матрицы, напряжение с пикселя усиливается. Усиленное напряжение оцифровывается аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) и переводится в двенадцатиразрядный код. Оцифрованные значения напряжений пикселей поступают на дальнейшую обработку в процессор. В процессе обработки осуществляется «склейка» изображений из отдельных пикселей. На рис. 2.4 представлено распределение оцифрованного значения напряжения по пикселям, составляющим изображение звезды.

С матрицей ФППЗ свяжем систему координат $O'X'Y'$, оси которой задаются направлениями строк и столбцов матрицы (рис.2.5). Плоскость осей $X'Y'$ параллельна плоскости осей XY ПСК, ось X' противоположна оси X а ось Y' противоположна оси Y . Ось Z перпендикулярна плоскости матрицы и пересекает ее в центре C .

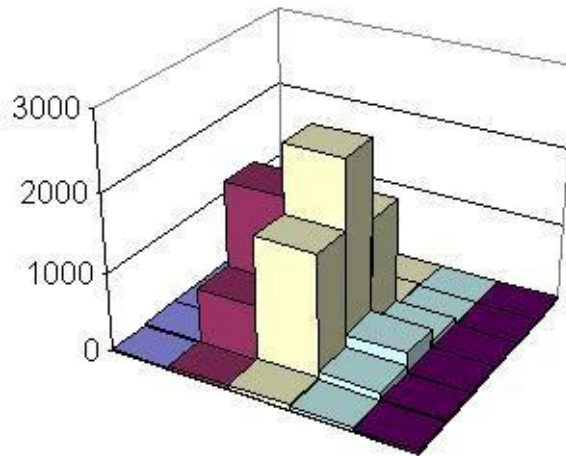


Рис. 2.4. Распределение энергии света звезды по пикселям ФППЗ

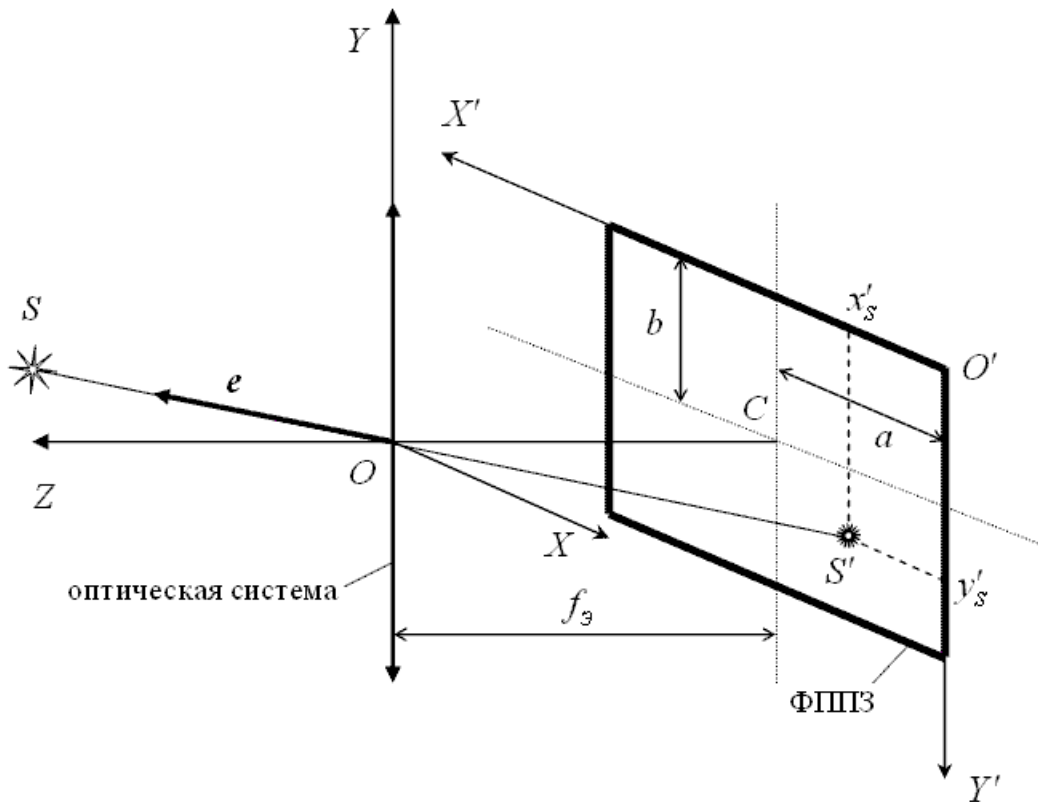


Рис. 2.5. Формирование энергетического центра визируемого объекта на матрице ФППЗ

После «склейки» в процессоре изображений, состоящих из набора пикселей, осуществляется расчет координат энергетических центров x'_{si} , y'_{si} изображения S' звезды S в системе координат матрицы ФППЗ.

Для определения угловых координат звезды, выдаваемых в БЦВС,

используются паспортные параметры конкретного прибора, учитывающие погрешности установки матрицы и искажения оптики. Грубо проекции e_x , e_y , e_z на оси ПСК единичного вектора e , направленного на звезду, можно вычислить следующим образом:

$$e_x = \frac{x'_s - a}{L}, \quad e_y = \frac{y'_s - b}{L}, \quad e_z = \frac{f_э}{L}, \quad (2.1)$$

где $L = \sqrt{(x'_s - a)^2 + (y'_s - b)^2 + f_э^2}$ (2.2)

a , b - координаты центра матрицы C по осям X' и Y' соответственно, $f_э$ - эквивалентное фокусное расстояние.

В штатном режиме работа АД-1 организована как циклическая последовательность секундных кадров поиска и измерения. Кадр поиска в каждом цикле предназначен для анализа изменений картины звезд визируемого участка небесной сферы и формирования параметров для кадра измерения. Кадр измерения в каждом цикле включает накопление сигнала, считывание и обработку информации с ФППЗ в рабочих окнах, сформированных относительно координат звезд, обнаруженных в кадре поиска, и суммарных сигналов изображений звезд. Обработка информации ФППЗ в кадре поиска и измерения включает формирование изображений звезд, учет сигналов дефектных элементов матрицы, селекцию выделенных изображений, вычисление суммарного сигнала и координат энергетических центров изображений в системе координат ФППЗ. Цикл обновления информации - 2 с.

2.6 Функционирование астродатчика

Включение астродатчика осуществляется путем подачи первичного питания постоянного тока напряжением 27 В, путем выдачи из бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС) команды подачи на прибор напряжения питания. В течение 60 с выполняются процедуры самотестирования (самоконтроля) вычислителя, ОЗУ, РПЗУ, вторичных источников питания (ВИП) и аппаратного интерфейса оконечного устройства (ОУ) астродатчика.[12]

При этом на второй секунде обеспечивается выдача команды на закрытие светозащитной шторки (СЗШ) для приведения её в исходное (закрытое) состояние.

Выключение астродатчика производится с помощью команды на снятие напряжения питания, инициализируемой в БЦВС. Выключение астродатчика происходит не позднее 6 с независимо от текущего режима, в котором находится астродатчик.

Пауза между повторным включением питания после выключения астродатчика должна быть не менее 6 с.

После режима самотестирования астродатчик готов к взаимодействию с БЦВС, осуществляемому по резервированным шинам обмена в соответствии с ГОСТ Р 52070-2003.

Управление астродатчиком осуществляется с помощью системы управления, которая формирует силовые команды включения/выключения астродатчика и управления механизмами светозащитной шторки и обеспечивает информационный обмен с астродатчиком.

3 Выбор и описание фотоприемника

3.1 Общее описание и технические характеристики фотоприемников (ФП) типа ПЗС

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью (ФПЗС) относятся к тем изделиям, значимость которых непрерывно возрастает и, несомненно, будет возрастать в дальнейшем вне зависимости от появления новых разновидностей интегральных схем и быстрого прогресса традиционных больших интегральных схем (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС).

ФПЗС применяются практически во всех областях, где требуется прием и обработка изображений. Уникальная фотонная аппаратура для научных исследований в космосе, экологии, биологии и медицине, аэрокосмические и наземные системы технического зрения для промышленности – это малая толика систем и устройств, создание которых стало возможным с появлением твердотельных приёмников изображения на основе ПЗС.

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью на сегодняшний день – одно из самых востребованных изделий микроэлектроники.

Целесообразно сравнить основные фотоэлектрические параметры отечественных матриц и зарубежных матриц.

1. Многообразие фотоэлектрических параметров современных ФП и систем их представления затрудняет простое представление обнаруживающей способности ФП.

В первом приближении обнаруживающая способность определяется двумя факторами и может быть представлена отношением:

- эффективностью преобразования полезного сигнала, т.е. шириной и максимальным значением кривой спектральной квантовой эффективности (в числителе);
- среднеквадратической величиной суммарного шума (в знаменателе).

Для современных ФП на основе кремния спектральный диапазон составляет 200÷1100 нм. Пропускание линзового объектива начинается от 450 нм.

Сравниваемые параметры ФП отечественных фирм и фирмы **e2v technologies** модификации Space CCD 47-20FI приведены в таблице 3.1. [27,28]

Таблица 3.1

Название	STAR1000	CCD 4720 FI AIMO	CCD 4720 VI AIMO	ФППЗ «Каскад»	ФППЗ «Вега»	KAI-1003M	KAI-2020M
Производитель	Sypress Logic	E2V	E2V	ОАО «ЦНИИ “Электрон”	НПП «Заряд-Т»	Kodak	Kodak
Максимальная квантовая эффективность, QE_{\max}	0,26	0,45	0,6...0,94	(0,2)		0.45	0.55
η , мкВ/электрон	11,6	4,5	4,5	(3)	6	7.5	5
<i>Readout noise</i> – шум считывания (СКО), электрон	70	2	2	70÷100	—	50	16
Шум матрицы (СКО), мкВ	800	200	200	200-300	200-300	50	50
Пороговая экспозиция матрицы (при идеальном усилителе), лк сек	$4 \cdot 10^{-5}$	$\approx 8 \cdot 10^{-6}$	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$ по ТЗ $\approx 4 \cdot 10^{-5}$ по факт данным	$\approx 5 \cdot 10^{-5}$	$\approx 6 \cdot 10^{-5}$
Интегральная чувствительность, В/лк сек ист «А»	20	25	25	7 ... 9	5 ... 7	30	8,5
Шум матрицы + шум тракта АД, мкВ		(220)	(220)	700			
Уровень насыщения	1,1 В	0,45 В или 100 000 электрон	0,45 В или 100 000 электрон	1,5 В	2,0 В или 340 000 е	1,3 В	40 МГц – 20,000 е 20 МГц – 40,000 е
Размер и количество пикселей	13×13 мкм, 1024×1024	13,3×13,3 мкм, 1024×1024	13,3×13,3 мкм, 1024×1024	23× (23-8 ^{**}) мкм, 512×512	13×13 мкм, 700×700	12,8×12,8 мкм, 1024×1024	7,4×7,4 мкм, 1600×1200
Архитектура	APS	FT /1x2/ - Frame Transfer -секция накопления, секция хранения, 1 вых. регистр, 2вых. узла	FT /1x2/ - Frame Transfer -секция накопления, секция хранения, 1 вых. регистр, 2вых. узла	FF /1x1/ - Full Frame - секция накопления, 1 вых. регистр, 1 вых. узел	FT /1x1/ - Frame Transfer -секция накопл, секция хранения, 1 вых. регистр, 1вых. узел	Interline CCD, Progressive Scan	Interline CCD, Progressive Scan
Тактовая частота, МГц	10	5	5	1,6	5	20	40
Динамический диапазон	—	50 000	50 000	—	—	—	40 МГц – 60 дБ; 20 МГц – 68 дБ
Пороговая экспозиция (для ФППЗ - при шуме тракта 100 мкВ), лк сек	$4 \cdot 10^{-5}$	$\approx 9 \cdot 10^{-6}$	$\approx 7 \cdot 10^{-6}$	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$		
Темновой сигнал	—	200 e/pixel/s	500 e/pixel/s	—	—	0,45 нА/см ²	<0,5 нА/см ²

2. Для уменьшения влияния поверхностных дефектов фирма e2v применяет технологию производства кристалла АИМО (Advanced Inverted Mode Operation). При этом обеспечивается меньшее влияние поверхностных дефектов на зарядовый пакет.

Управление матрицей при АИМО предполагает повышенный по сравнению с НИМО (Non Inverted Mode Operation) уровень на подложке и позволяет, как следует из технических характеристик, приведенных фирмой e2v (Datasheet), уменьшить темновой ток (и, соответственно, одну из составляющих шума считывания) и тем самым увеличить допустимое время накопления, а также минимизировать охлаждение.

Отличия между АИМО и НИМО поясняют Таблицы 3.2 и 3.3 основных характеристик приборов с прямой засветкой e2v CCD 47-20FI.

Таблица 3.2

Высокопроизводительный CCD сенсор CCD47-20 АИМО
(CCD47-20 АИМО High Performance CCD Sensor)

	Min	Typical	Max	
Peak charge storage	60k	100k	–	e^- /pixel
Peak output voltage (no binning)	–	450	–	mV
Dark signal at 293 K	–	100	200	e^- /pixel/s
Dynamic range	–	50 000	–	
Charge transfer efficiency parallel	–	99.9999	–	%
serial	–	99.9993	–	%
Output amplifier responsivity	3.0	4.5	6.0	mV/ e^-
Readout noise at 243 K grade 0 and 1	–	2.0	4.0	rms e^- /pixel
grade 2	–	3.0	6.0	rms e^- /pixel
Maximum readout frequency	–	5.0	–	MHz
Response non-uniformity	–	1	3	% of mean
Dark signal non-uniformity (see notes 3 and 8)	–	40	80	e^- /pixel/s

Высокопроизводительный CCD сенсор CCD47-20 NIMO
(CCD47-20 NIMO High Performance CCD Sensor)

	Min	Typical	Max	
Peak charge storage	80k	120k	–	e^-/pixel
Peak output voltage	–	540	–	mV
Dark signal at 293 K	–	10k	20k	$e^-/\text{pixel/s}$
Dynamic range	–	60 000	–	
Charge transfer efficiency parallel	–	99.9999	–	%
serial	–	99.9993	–	%
Output amplifier responsivity	3.0	4.5	6.0	mV/e^-
Readout noise at 243 K grade 0 and 1	–	2.0	4.0	$\text{rms } e^-/\text{pixel}$
grade 2	–	3.0	6.0	$\text{rms } e^-/\text{pixel}$
Maximum readout frequency	–	5.0	–	MHz
Response non-uniformity	–	3	10	% of mean
Dark signal non-uniformity (see notes 3 and 8)	–	1000	2000	$e^-/\text{pixel/s}$

Неравномерность темнового тока (dark signal non-uniformity) измеряется в диапазоне температур $-40^\circ\text{C} \dots -20^\circ\text{C}$.

Анализируя таблицы 3.2 и 3.3 можно сделать следующий вывод: кристалл, произведённый по технологии AIMO, имеет в 100 раз более низкий уровень темнового тока и в 25 раз более низкую неравномерность темнового тока, что снижает степень нагрева кристалла и уменьшает время, необходимое для обработки входящего зарядового пакета. Также данный кристалл имеет в три раза меньшую неравномерность отклика по сравнению с произведённым по технологии NIMO при тех же параметрах по быстродействию и выходной чувствительности, более низком выходном напряжении.

3. Архитектура матриц e2v CCD47-20 одинакова для модификаций как с

прямой (FI), так и с обратной засветкой (VI).

Очевидно, что два выходных узла фактически увеличивают частоту чтения до 10 МГц, но потребуют «удвоения» габаритов электронного тракта.

Лучшую привязку аналогового сигнала при оцифровке и в итоге уменьшение шума считывания обеспечивает наличие закрытых от света строк и столбцов в секциях накопления и хранения, а также наличие дополнительных элементов в выходном регистре.

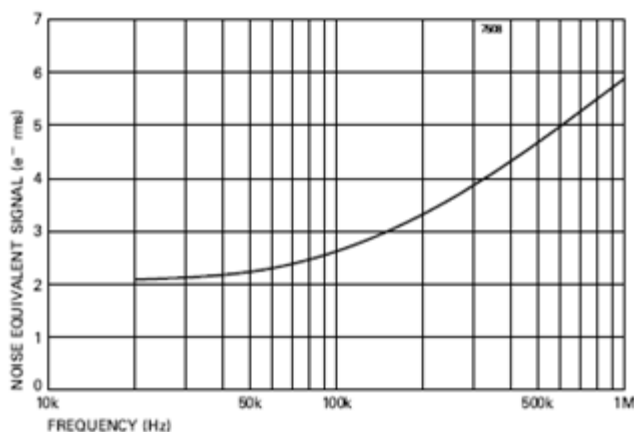


Рис. 3.1. Шум выходного усилителя в зависимости от частоты считывания матрицы e2v CCD47-20

Приводимые значения шума считывания 2 электрона на пиксел (СКО) даны для частоты считывания 20 КГц и температуры -30°C .

Для частоты 5 МГц, являющейся предельной частотой для этой матрицы, шум считывания получен путем экстраполяции (линейной, как следует из рис. 3.1.) и должен составлять 8-9 электрон (СКО).

Отличия в спектральной квантовой эффективности приборов с прямой и обратной засветкой иллюстрируют следующие рисунки, взятые из технических характеристик, приведенных фирмой e2v (Datasheet):

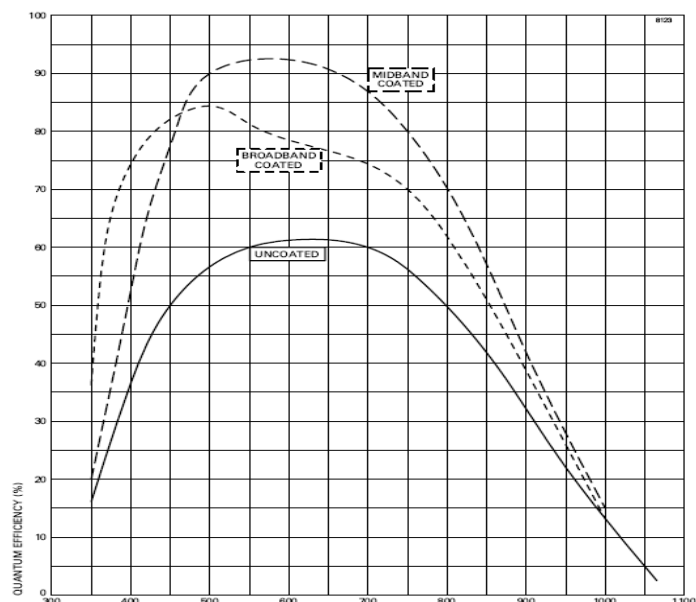


Рис. 3.2. Квантовая эффективность CCD матрицы фирмы e2v типа CCD47-20.

Пунктирные кривые соответствуют различным видам просветления.

Очевидно, что применение обратной засветки повышает максимальную квантовую эффективность более чем в 2 раза с просветляющим покрытием вида MIDBAND и не менее чем в 1,5 раза при отсутствии просветляющего покрытия. Шумы же считывания одинаковы для приборов с прямой и обратной засветкой.

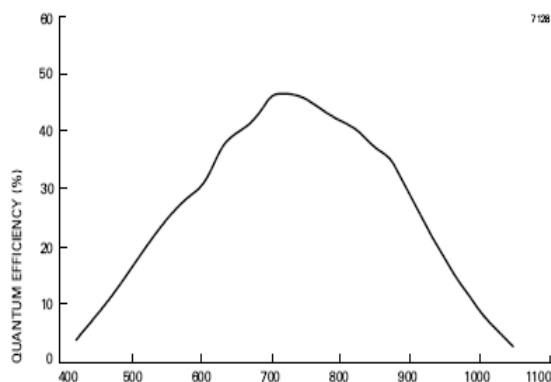


Рис. 3.3. Квантовая эффективность CCD матрицы фирмы e2v типа CCD47-20 FI.

Завал в левой части кривой вызван поглощением в электродах и

поликремнии.

4. Характеристика спектральной чувствительности, типичная для приборов, выполненных по трехуровневой технологии ЦНИИ «Электрон» с прямой засветкой типа «Вега», имеет величину квантовой эффективности в максимуме не более 40% исходя из физических принципов (потери света в электродах и поликремнии).

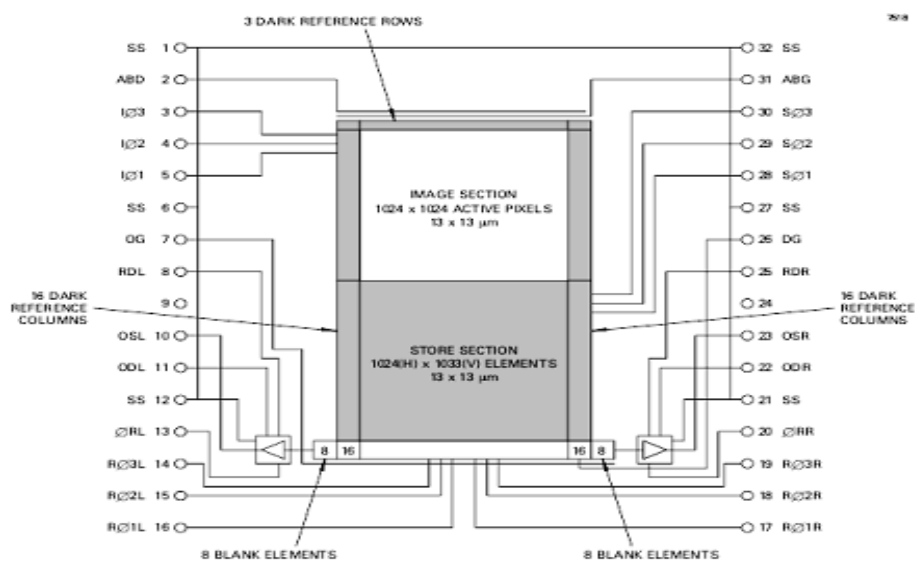


Рис. 3.4. Архитектура CCD матрицы e2v типа CCD47-20 BI.

5. Firmой e2v разработаны и выпускаются приборы нового поколения, так называемые L3Vision (Low Light Level) для регистрации очень малых световых сигналов с шумами считывания меньше одного электрона.

Архитектура прибора CCD97-00 Back Illuminated 2-Phase IMO Series Electron Multiplying CCD Sensor представлена на рисунке. Главной особенностью их является дополнительный усилительный регистр.

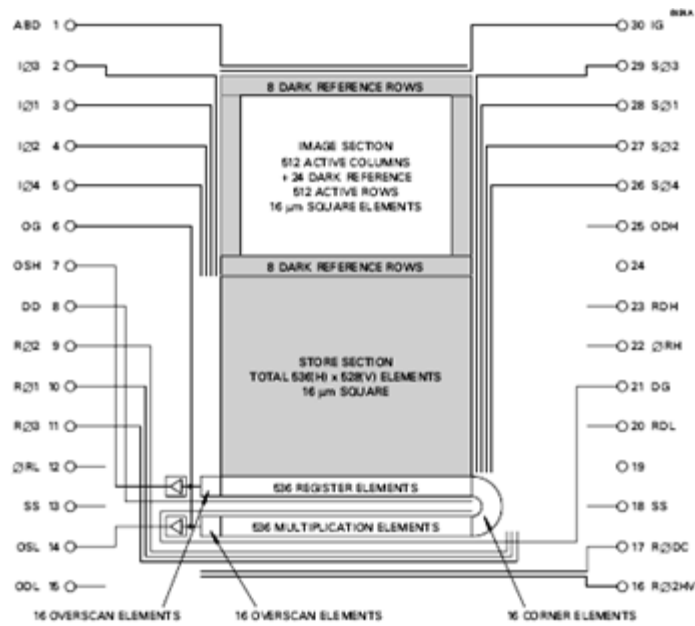


Рис. 3.5. Архитектура CCD97-00 Back Illuminated 2-Phase IMO Series Electron Multiplying CCD Sensor

Однако подобные приборы не имеют летной истории, радиационная стойкость их является открытым вопросом, и требуют уровня 40 В на электроде R02HV high дополнительного регистра.

TYPICAL VARIATION OF DARK CURRENT WITH TEMPERATURE ($V_{SS} = +9.5 \text{ V}$)

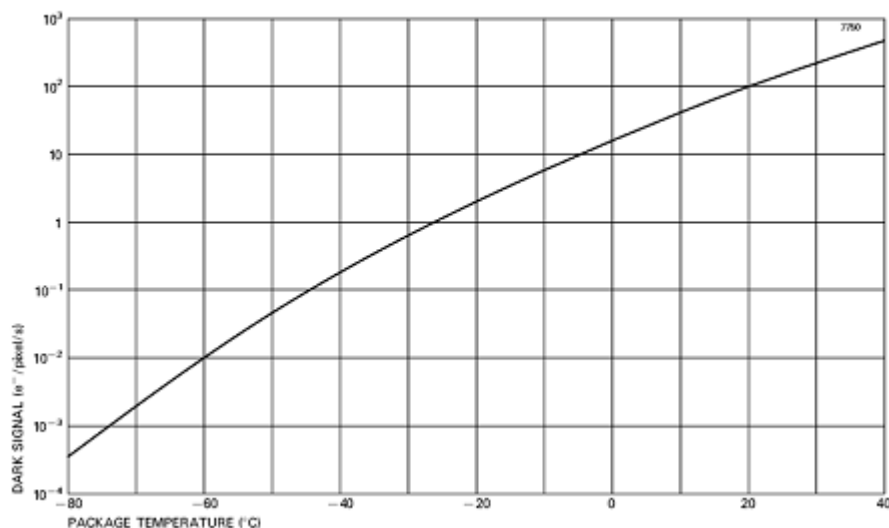


Рис. 3.6. Зависимость среднего темнового тока от температуры.

Средний темновой ток при температуре корпуса $T = -30^{\circ}\text{C}$ для прибора

CCD47-20 FI AIMO составляет менее 1 электрон /пиксел в секунду (см. Datasheet), тогда как для ФППЗ «Вега» средний темновой ток в аналогичных условиях составляет 30 электрон /пиксел в секунду.

Неравномерность среднего темнового тока прибора CCD47-20 FI AIMO составляет 40 электрон /пиксел в секунду (СКО) и еще раз подтверждает более высокий технический уровень прибора CCD47-20 FI AIMO по сравнению с CCD47-20 FI NIMO, у которых этот параметр составляет 1000 электрон /пиксел в секунду (СКО).

Квантовая эффективность приборов с виртуальной фазой, например ФППЗ 1077ELCM разработки НПП «ЭЛАР», не может быть использована в полной мере при наличии многолинзового объектива, тем более что основная часть излучения большинства звезд заключена в красной и ближней инфракрасной области спектра. Не приводятся все фотоэлектрические параметры, позволяющие оценить обнаруживающую способность данного прибора. Радиационная стойкость приборов такого типа также может потребовать исследования. Прямоугольную форму секции также нельзя признать оптимальной с точки зрения минимизации габаритов астродатчика.

В системе параметров **e2v technologies** нормируются следующие компоненты, влияющие (в первом приближении) на обнаруживающую способность:

- Шум считывания (Readout noise)
- Темновой сигнал (Dark signal).

Можно считать, что шум темнового сигнала равен произведению коэффициента преобразования выходного узла на квадратный корень из числа электронов темнового сигнала

- Неравномерность темнового сигнала матрицы, или темновой рельеф (Dark signal non-uniformity). «Белыми дефектами» (White spots) считаются пиксели, у которых темновой ток в 125 раз больше среднего

темнового тока. Пиксели с меньшим значением темнового тока дефектами не считаются.

При вычитании темнового кадра темновой рельеф сводится к нулю, но при этом в разностном кадре будет получен шум считывания, увеличенный в $\sqrt{2}$ раз.

e2v technologies приводит зависимости темнового сигнала и неравномерности темнового сигнала от температуры.

Также e2v technologies нормирует:

- ловушки (Traps), захватывающие более 200 электронов;
- черные дефекты (Black spots), сигналы в которых составляют менее 80% от среднего при локальном среднем уровне $\approx 50\%$ от насыщения;
- Slipped columns— столбцы, амплитуда сигнала которых более 200 электронов;
- White column — столбцы, содержащие более 21 «белого дефекта» (White spots);
 - Black column — столбцы, содержащие более 21 «черного дефекта» (Black spots)

Очевидно, что приводимые НПП «Заряд-Т» и НПП «ЭЛАР» параметры матриц не позволяют достоверно оценить обнаруживающую способность этих приборов, однако у НПП «Заряд-Т» приводится непосредственно измеренный суммарный шум, а НПП «ЭЛАР» приводит лишь отдельные (измерение которых сильно затруднено) его составляющие.

Итак, ведущие зарубежные фирмы предлагают широчайший выбор ФПЗС для любых приложений. Отечественные ФПЗС уступают зарубежным аналогам по предельным значениям параметров. В то же время, последние научно-исследовательские работы в области ФПЗС и значительное усовершенствование технологической базы говорят о явном подъеме этого направления отечественной микроэлектроники и позволяют смотреть на будущее российских ФПЗС с оптимизмом. В России в настоящее время

производятся практически все типонамины известных линейных и матричных приемников изображения. Конкурентоспособными сегодня остаются оригинальные отечественные разработки ФПЗС специального назначения, которые базируются на высоком научном потенциале предприятий-разработчиков.

1) Приводимые в Datasheet CCD47-20 FI АИМО характеристики прибора являются достаточно полными для выполнения расчетной оценки их качества в составе астродатчика.

2) Приводимые как НПП «Заряд-Т», так и НПП «ЭЛАР» характеристики не позволяют в полной мере аналитически оценить их качество.

3) Матрица e2v technologies CCD47-20 FI АИМО с прямой засветкой по обнаружительной способности превосходит ФППЗ «Вега» разработки НПП «Заряд-Т» в несколько раз.

4) Матрицы с обратной засветкой превосходят по обнаружительной способности матрицы с прямой засветкой, что неоднократно отмечено в современных источниках.

3.2. Требования к фотоприемнику

ФППЗ должен удовлетворять следующим требованиям:

- высокое качество изображения;
- высокая чувствительность (согласно ТЗ обнаружение звезд до $m_a=6$ звездной величины);
- большое число включений;
- большое быстродействие (согласно ТЗ не менее 5 Гц);
- минимальные затраты времени на вывод неинформационных строк и элементов ФППЗ.

3.3. Обоснование выбора матрицы

Семейство ПЗС-матриц CCD47 фирмы e2V [24,25,26] имеют полнокадровую архитектуру. Конструкция с обратной засветкой в совокупности с усилителем, обладающим сверхмалым уровнем шума, делают прибор идеальным для применений в научной сфере. Для улучшения чувствительности, ПЗС-матрица сделана без схемы с антиблумингом.

Общий вид матрицы представлен на рисунках 3.7 и 3.8.

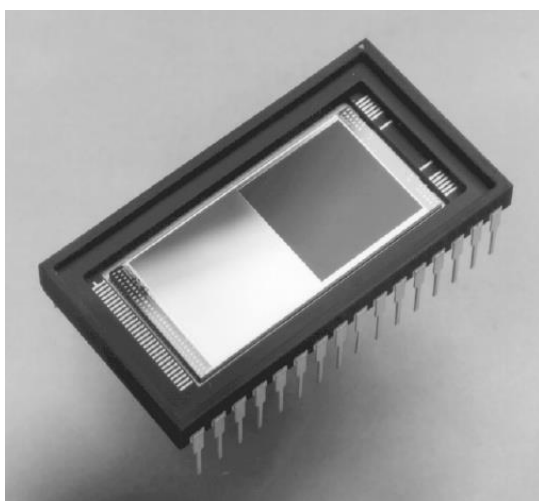


Рис. 3.7. CCD47-20 NIMO VI
керамическом корпусе DIP32

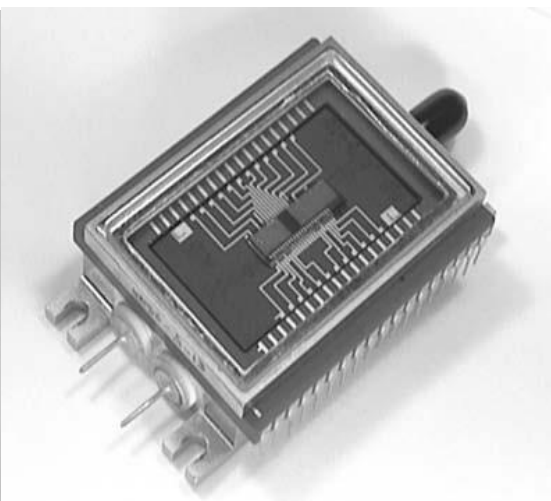


Рис. 3.8. CCD47-20 NIMO VI
с твердотельным элементом Пельтье

Прибор имеет одиночный последовательный регистр, снабженный управляемым каналом для удаления ненужной информации. Цепи усиления расположены на двух концах регистра. Следовательно, строка данных может быть обработана либо одним усилителем, либо разделена и обработана двумя.

Технические характеристики матрицы CCD47-20

Основные характеристики для данной матрицы приведены в таблице 3.4 и на рисунках 3.9, 3.10, и 3.11.

Таблица 3.4

Характеристика	
Размерность матрицы	1024×1024
Размер пикселя	13×13 мкм
Максимальная частота считывания	5 МГц
Чувствительность	4,5 мкВ/е ⁻
Спектральный диапазон	200÷1100 нм
Динамический диапазон	50000:1
Шум выходного усилителя при считывании с частотой 20 кГц	2 е ⁻

Шум выходного усилителя в зависимости от частоты считывания представлен на рис. 3.1.

Спектральная квантовая эффективность матрицы CCD 47-20 VI NIMO представлена на рис. 3.2.

Зависимость среднего темнового тока от температуры представлена на рис. 3.6.

Проанализировав табл. 3.1 и 3.4, можно сделать следующий вывод: Повышение быстродействия обеспечивается фоточувствительной матрицей CCD 4720 VI AIMO, которая имеет определённые преимущества над прочими матрицами в своём классе. Данная матрица обладает самым низким среди аналогов шумом считывания, а также достаточно низким шумом матрицы, что в некотором роде позволяет компенсировать отставание по таким параметрам, как тактовая частота, интегральная чувствительность и пороговая экспозиция. Матрица имеет секцию хранения информации,

позволяющую избежать простоя в процессе накопления сигнала, два выходных узла, что способствует увеличению скорости считывания информации в БЦВС. По размеру и количеству пикселей CCD4720 почти не уступает аналогам в своём классе. Основным преимуществом матрицы является низкий уровень шумов, а также самая высокая среди представленных в таблице 3.1. аналогов максимальная квантовая эффективность. Крайне положительное влияние на быстродействие оказывает возможность провести 8 измерений на один сеанс поиска, а также то, что измеренную информацию можно выдавать в любом кадре. Также повышению быстродействия способствует покадровый тип считывания вместо построчного, используемого в предшествующей фоточувствительной матрице «Каскад 1А». В целом данная матрица компенсирует незначительные отставания от аналогов в скорости низким уровнем шумов и приемлемыми значениями прочих параметров.

3.4 Организация вывода информации с ФП

В режиме поиска звезд в поле зрения АД вывод информации ФППЗ (кадра обнаружения) осуществляется со всей фоточувствительной области ФППЗ. При этом, с целью сокращения времени считывания информации и повышения отношения сигнал/шум выходного сигнала ФППЗ, а следовательно и вероятности обнаружения звезд, вывод информации осуществляется в режиме суммирования сигналов двух строк в выходном регистре ФППЗ (бинирование).

Из зон слежения информация выводится построчно с частотой считывания до 1 МГц. Вне зон слежения информация элементов строк, пересекающих зоны слежения, выводится в сток выходного устройства ФППЗ с повышенной частотой (до 3-х МГц). Из строк, не пересекающих зоны слежения (то есть не несущих полезной информации о сигнале звезд), заряды ФППЗ целой строкой переносятся в специальную стоковую область, расположенную вдоль выходного регистра ФППЗ, с частотой примерно (400 - 500) КГц. При этом время вывода зарядов неинформационных строк существенно уменьшается - в (250 - 500) раз.

4 Расчетная оценка основных характеристик АД

В данном разделе приведены оценки характеристик обнаружения и точности измерения координат звезд с обоснованием выбранных основных параметров АД.

4.1 Исходные данные для оценки основных характеристик АД

Исходные данные для оценки основных характеристик АД приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Наименование и обозначение параметра	Номинальные значения параметров для выбранного варианта АД
Диаметр входного зрачка, Двх. зр.	25
Фокусное расстояние объектива, f'	52
Коэффициент максимального пропускания оптики, τ_{\max}	0,7
Диаметр кружка рассеяния, Дкр. рас	40 мкм
Число фоточувствительных элементов ФППЗ, $N_x \times N_y$	1024×1024
Размер фоточувствительного элемента ФППЗ, $d_x \times d_y$	(13×13) мкм
Интегральная вольтовая чувствительность ФППЗ, $S_{\text{инт.}}$	25 В/лк·с
Диапазон звездных величин, m_a	-0,5 ÷ +6,0
Время накопления, $t_{\text{нак.}}$	0,16с
Число кадров накопления, по которому осуществляется обнаружение и измерение координат	1

4.2 Оценка чувствительности АД

Оценка чувствительности АД осуществляется с целью определения расчетным путем предельной звездной величины (m_a (пред)) звезды, выделяемой в поле зрения АД в условиях влияния принятого уровня фоновой засветки, при обеспечении допустимого значения вероятности пропуска звезды, с учетом изменения значений параметров оптической системы и фотоприемного устройства в условиях эксплуатации АД.

Основным параметром при оценке чувствительности является величина выделенного сигнала и её превышение над уровнем шума (отношение сигнал/шум, величина которого определяет вероятность обнаружения звезды (и, соответственно, пропуска звезды)) и определяется следующими факторами:

- параметрами оптической системы;
- характеристиками приемника излучения (ФППЗ);
- параметрами фотоэлектронного тракта;
- алгоритмом обработки информации при обнаружении звезд;
- влиянием условий эксплуатации.

4.2.1 Оценка отношения сигнал/шум

Рассмотрим обобщенную функциональную схему [11] системы ориентации (рисунок 4.1).

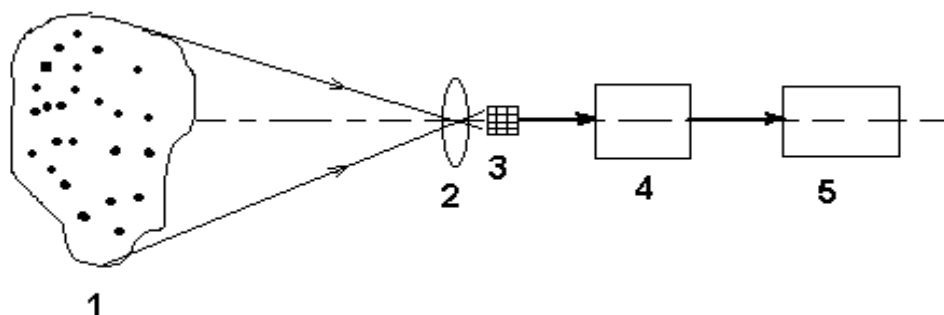


Рисунок 4.1 - Обобщенная функциональная схема системы ориентации

1 - участок небесной сферы, 2 - оптическая система ОЭП ориентации, 3 - матрица ПЗС, 4 – бортовой компьютер, 5 - управляющие устройства

Изображение от участка небесной сферы 1 фокусируется оптической системой 2 в плоскости наилучшего видения, где установлено многоэлементное фотоприемное устройство 3 - матрица ПЗС фирмы E2V

CCD 4720. На вход матрицы поступает оптический сигнал. Этот сигнал преобразуется в электрический сигнал пропорционально освещенности в каждой ячейке матрицы. Электрический сигнал поступает на вход бортового компьютера 4, который анализирует его и выдает или не выдает корректирующий импульс на управляющие устройства 5 (двигатели маховиков) космического аппарата. Таким образом, сохраняется определенная ориентация оптической оси прибора системы ориентации относительно некоторой инерционной системы координат.

Текущей задачей является определение значений некоторых параметров прибора, при которых на выходе приемника излучения обеспечивается требуемое соотношение между полезным сигналом и сигналом, вызываемым внутренними (собственные шумы приемника) помехами. Эта задача сводится к нахождению значений параметров прибора по заданной пороговой чувствительности.

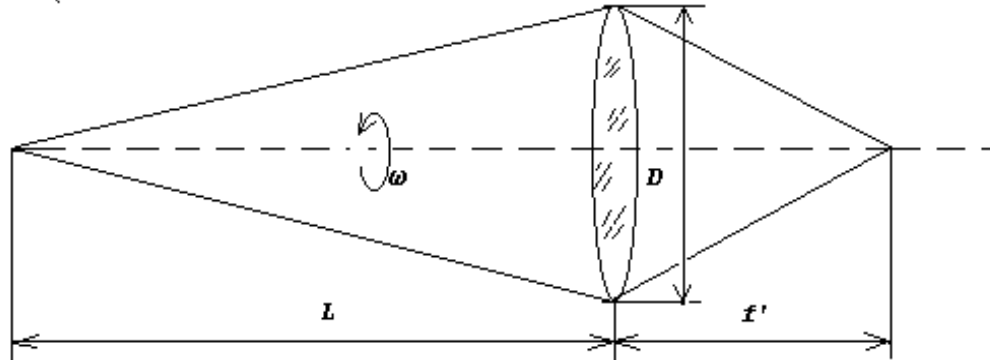
Исходными являются данные, характеризующие излучение объекта, спектральная прозрачность среды и элементов оптической системы и чувствительность приемника. Наиболее важной характеристикой излучения объекта является спектральный состав излучения, описываемый одной из функций спектральной плотности: потоком излучения $\Phi(\lambda)$, энергетической силой света $I(\lambda)$, энергетической яркостью – $L(\lambda)$, энергетической светимостью – $M(\lambda)$.

Отметим, что звезды в первом приближении являются абсолютно черным телом [2], следовательно, спектральный состав излучения звезды может быть определен, если известна ее температура T .

На первом этапе определим величину потока излучения от звезды, попадающего на приемник излучения. Для этого воспользуемся теорией, изложенной в работах [7,8].

Поскольку спектральный состав потока излучения звезды в общем случае описывается функцией спектральной плотности, а на пути

распространения претерпевает селективное ослабление в элементах оптической системы, то необходимо все рассуждения и выводы зависимостей производить применительно к монохроматическому потоку излучения с



последующим переходом к интегральному излучению.

Рисунок 4.2 - Пояснения к выводу формулы эффективного потока излучения

Монохроматический поток излучения от объекта, попадающий в прибор, в общем случае определяется как функцией спектральной плотности энергетической яркости $L(\lambda)$, так и величиной телесного угла ω (рисунок 4.2) в пределах которого распространяющийся от объекта поток попадает в оптико-электронный прибор.

Эффективная для данного приемника величина монохроматического потока излучения будет

$$d\Phi_{\lambda \text{эфф}} = \Phi(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (4.1)$$

где $s(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность приемника излучения, представляющая собой отношение функции спектральной чувствительности S_λ к ее максимальному значению $S_{\lambda \text{max}}$;

$\tau_c(\lambda)$ и $\tau_o(\lambda)$ – функции спектрального пропускания потока излучения средой и оптической системой. Так как разрабатываемый АД будет использоваться в космическом пространстве, то $\tau_c(\lambda)$ можно пренебречь, приняв за единицу.

Тогда эффективная величина сложного потока излучения, падающего

на приемник, может быть вычислена интегрированием выражения (4.1) по всем длинам волн, т.е.

$$\Phi_{\text{эфф}} = \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda \quad (4.2)$$

Умножая и деля правую часть равенства (4.2) на одну и ту же величину $\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda$, получим

$$\Phi_{\text{эфф}} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda} \cdot \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda \quad (4.3)$$

Отношение интегралов в этом выражении не что иное, как коэффициент использования приемника по реальному излучателю с учетом ослабления потока средой и деталями оптической системы

$$k_p = \frac{\int_0^{\infty} \phi(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi(\lambda) d\lambda}, \quad (4.4)$$

а интеграл $\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda$ представляет собой полный поток излучения объекта на входе прибора без учета его ослабления средой, т.е.

$$\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda = \Phi_p.$$

С учетом введенных выше обозначений из (4.3) имеем

$$\Phi_{\text{рэфф}} = \Phi_p \cdot k_p. \quad (4.5)$$

К аналогичному результату можно прийти иным путем. Если селективное ослабление потока средой и оптической системой уподобить ослаблению потока фильтром, работающим совместно с приемником излучения, то относительная спектральная чувствительность такого редуцированного приемника может быть представлена в виде

$$s'(\lambda) = s(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda). \quad (4.6)$$

Таким образом, рассматривая на входе прибора не ослабленный средний поток, характеризуемый функцией $\Phi(\lambda)$ для эффективных величин монохроматического и сложного потоков излучения, будем иметь

$$d\Phi_{\lambda\phi\phi} = \Phi(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (4.7)$$

$$\Phi_{\phi\phi} = \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot s'(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.8)$$

Умножая и деля правую часть последнего равенства на величину

$$\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda = \Phi_p,$$

получим

$$\Phi_{\phi\phi} = \Phi_p \cdot \frac{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot s'(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda} = \Phi_p \cdot k_p, \quad (4.9)$$

где выражение для коэффициента использования приемника по реальному излучателю записано в привычном виде, но после подстановки значения $s'(\lambda)$, становится одинаковым с (4.5).

Второй этап заключается непосредственно в определении зависимости, позволяющей рассчитывать площадь входного зрачка прибора, при которой обеспечивается выделение полезного сигнала на фоне собственных шумов приемника излучения.

Для того чтобы на выходе прибора выделить сигнал от объекта на фоне шумов, эффективная величина потока излучения от него должна в заданное число раз m превышать эффективную величину порогового потока приемника излучения:

$$\Phi_{\phi\phi} \geq m \cdot \Phi_{n.\phi\phi} \quad (4.10)$$

или

$$\Phi_p \cdot k_p \geq m \cdot \Phi_{\text{стал.п}} \cdot k_{\phi}, \quad (4.11)$$

где:

m – отношение сигнал/шум;

$\Phi_{\text{этал.п}}$ – пороговый поток приемника по эталонному излучателю;

k_p и $k_э$ - коэффициенты использования по излучению реального и эталонного источников соответственно.

Для задач обнаружения и надежного выделения полезного сигнала из шумов, принимают $m = 5 \dots 10$, а при измерениях величина коэффициента m достигает $20 \dots 50$ и более.

Из (4.5) получаем

$$\Phi_p = m \cdot \Phi_{\text{этал.п}} \cdot \frac{k_э}{k_p} \quad (4.12)$$

Для случая, если излучателем является бесконечно удаленный источник, звезда, эффективная величина потока излучения определяется из выражения

$$\Phi_{\text{эфф}} = E \cdot A_{\text{ex}} \cdot k_p, \quad (4.13)$$

где

$$E = \frac{E^{\text{св}}}{K_{\text{max}}(\lambda) \cdot \eta} \quad (4.14)$$

- энергетическая освещенность, создаваемая звездой на входе прибора;

η - коэффициент использования глазом излучения звезды, имеющей температуру T ; в разрабатываемом приборе вместо наблюдателя используется ФП, поэтому в расчетах за коэффициент использования глазом излучения звезды примем коэффициент использования ФППЗ излучения звезды [11];

$E^{\text{св}}$ – освещенность, создаваемая звездой на входе прибора.

Звездная величина M , определяющая меру видимого блеска небесного тела, связана с освещенностью $E^{\text{св}}$, создаваемой небесным телом, зависимостью [1,2]

$$M = -2,51 \lg E^{\text{св}} + C, \quad (4.15)$$

где C – постоянная величина, равная такой звездной величине M_0 , при

которой небесное тело создает на площадке освещенность в 1 лк.

Освещенность в 1 лк у границы земной атмосферы может быть создана небесным телом, видимый блеск которого характеризуется звездной величиной $M_0 = -13,75$.

Выражение (4.15) перепишем в виде

$$-\frac{M-C}{2,5} = \lg E^{cb},$$

и разрешая его относительно E^{cb} , получим зависимость, позволяющую рассчитывать освещенность от небесных тел по их звездным величинам

$$E^{cb} = 10^{\frac{M-C}{2,5}}, \quad (4.16)$$

или с учетом значения коэффициента c , получим

$$E^{cb} = 10^{\frac{13,75+M}{2,5}} \quad (4.17)$$

Следовательно, подставляя (4.17) в (4.14) и далее на основе (4.13), имеем

$$\Phi_{эфф} = 10^{\frac{13,75+M}{2,5}} \cdot \frac{1}{K_{max}(\lambda) \cdot \eta} \cdot A_{ex} \cdot k_p \quad (4.18)$$

Таким образом, энергетическое условие регистрации звезд матрицей ПЗС может быть описано энергетическим уравнением [6]. Левая часть уравнения соответствует эффективному потоку, необходимому для получения сигнала с заданным превышением над шумами, а правая - эффективному потоку от регистрируемой звезды, падающему на приемник изображения. В итоге энергетическое уравнение получается в виде:

$$\frac{10^{-(13,75+m_v)/2,5} \cdot A_{ex} \cdot K_p}{K_{max}(\lambda) \cdot \eta} = m \cdot F_{нор} \cdot K_{э}, \quad (4.19)$$

где:

m_v - видимый блеск звезды; оценивается звездной величиной;

A_{ex} - площадь входного зрачка;

K_p - коэффициент использования по излучению реального источника;

$K_э$ - коэффициент использования по излучению эталонного источника; для ПЗС на основе кремния $K_э=0.3$ [11];

$K_{max}(\lambda)$ - коэффициент перевода; $K_{max}(0,555 \text{ мкм}) = 683 \text{ лм/Вт}$;

η - коэффициент использования фотоприемной матрицей излучения звезды;

m - соотношение сигнал/шум;

$F_{пор}$ - пороговый поток фотоприемника.

Из формулы (4.19) отношение сигнал/шум:

$$\frac{-(13.75 + m_v) / 2.5}{10 \cdot A_{ex} \cdot K_p} = m \quad (4.20)$$

$$K_{max}(\lambda) \cdot \eta \cdot F_{пор} \cdot K_э$$

Пороговый поток фоточувствительной площадки ФПМ ПЗС с учетом режима накопления можно записать как:

$$F_{пор} = \frac{N_{ш} \cdot q}{S_e \cdot t_n}, \quad (4.21)$$

где $N_{ш}$ - среднеквадратическое число шумовых электронов, приходящихся на зарядовый пакет;

S_e - интегральная чувствительность по источнику типа А, мА/Вт;

q - величина заряда одного электрона, $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

t_n - время накопления, с.

Интегральная чувствительность для кремния с учетом отражения от стекла и границы раздела Si-SiO₂ по источнику А (АЧТ с T=2856 К) равна 57 мА/Вт.[11]

Тогда, например, если мы используем охлаждение и примем $t_n = 0.16$ с, то пороговый поток фоточувствительных элементов матрицы ПЗС составит:

$$F_{\text{нор}} = N_{\text{ш}} \cdot q / S_e \cdot t_{\text{н}} = 1800 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} / 57 \cdot 10^{-3} \cdot 0,16 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ Вт.}$$

Коэффициент использования приемника по реальному излучению выражается формулой

$$K_p = \frac{\int f(\lambda) \cdot \tau \cdot s(\lambda) d\lambda}{\int f(\lambda) d\lambda}, \quad (4.22)$$

где $s(\lambda)$ - спектральная характеристика фотоприемника; в нашем случае фотоприемника на основе кремния;

τ - коэффициент, показывающий величину ослабления сигнала при прохождении его через оптическую систему; примем $\tau = 0,7$.

Если принять допущение, что звезда является абсолютно черным телом, то выражение, стоящее в знаменателе формулы (4.22), определяет общий суммарный поток от звезды, который можно рассчитать по закону Стефана-Больцмана, а спектр звезды $f(\lambda)$ зависит от температуры звезды и может быть рассчитан по приведенной формуле Планка.

Звезды подразделяются по спектральным классам в соответствии с их собственной температурой. По этому признаку звезды относят к спектральным классам, обозначаемым в порядке убывания температуры буквами W, O, B, A, F, G, K, M.

Каждый класс охватывает звезды с определенным спектральным составом, характеризуемым цветовой температурой.

По формуле (4.22) программным путем произведены вычисления величины K_p для звезд различных спектральных классов. Для этого по формуле Планка для разных значений температур, соответствующих вышеуказанным спектральным классам, вычислены значения $f(\lambda)$. Если подставить данные значения $f(\lambda)$ в формулу (4.22), то легко можно вычислить значения K_p для известной спектральной характеристики $s(\lambda)$. Результаты расчета приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Коэффициент K_p для звезд различных спектральных классов

W	O	B	A	F	G	K	M
0.00072	0.01681	0.03990	0.09669	0.11652	0.10726	0.08801	0.02195

Согласно [11] для расчета выбираем класс звезд В.

Итак, теперь имеются все данные для расчета отношения С/Ш. Подставим их в формулу (4.20):

$$\frac{10^{-(13.75+6)/2.5} \cdot 1,964 \cdot 10^{-3} \cdot 0,03990}{683 \cdot 0,95 \cdot 5 \cdot 10^{-14} \cdot 0,3} = m \quad (4.23)$$

Таким образом, отношение С/Ш:

$$m=5,83 \approx 6.$$

4.2.2 Вероятностные характеристики обнаружения звёзд

Задачей расчёта чувствительности матрицы фотоприемника АД является определение предельной звёздной величины, которая обнаруживается АД на заданном фоне за время обнаружения ($t_{обн}$) с заданной вероятностью пропуска ($P_{пр}$) при действии дестабилизирующих факторов условий эксплуатации для заданного алгоритма выделения сигнала.

Расчёт вероятности пропуска (Q) за время обнаружения, включающее несколько кадров обнаружения определяется с учётом:

M – количество кадров обнаружения;

k – количество кадров, в которых обнаружена звезда;

p – вероятность обнаружения звезды в одном кадре;

q – вероятность пропуска звезды в одном кадре ($q = 1 - p$);

P – вероятность обнаружения звезды за несколько кадров;

$Q = 1 - P$;

Исходя из предположения нормального закона распределения суммарного сигнала в изображении звезды, вероятность обнаружения звезды в одном кадре накопления можно записать в следующем виде:

$$P = 0.5(1 - \Phi(z)),$$

$$\text{где: } \Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt \text{ - интеграл Лапласа;}$$

$$Z = \frac{U_{пор} - U_{\Sigma c}}{\sigma_{\Sigma}};$$

$U_{пор} = 1\text{ мВ}$ – величина порога срабатывания;

$U_{\Sigma c}$ - суммарное значение сигнала от звезды;

σ_{Σ} - СКО определения суммарного сигнала.

В таблице 4.3 даны значения СКО для случая: $t_{нак} = 0,16$ с, $f = 51,9$ мм

Таблица 4.3

m_a	σ_Σ
+1.0	0.13
+2.0	0.24
+3.0	0.51
+4.0	1.39
+5.0	3.21
+6.0	9.86

В таблице 4.4 даны значения вероятности обнаружения предельной звёздной величины в кадре накопления.

Таблица 4.4

m_a	P
+1.0	0.99999
+2.0	0.99983
+3.0	0.99865
+4.0	0.99772
+5.0	0.99755
+6.0	0.99685

Расчёт значений $\Phi(z)$ при заданных параметрах проводится при помощи приложения SMath studio:

$$F(t) := \frac{2}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^{-2} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

$t := 1$

$F(t) = -0.9545$ +

$p := 0.5 \cdot (1 - F(t))$

$p = 0.9772$

На рис. 4.3 показан график зависимости вероятности обнаружения звезды от её звёздной величины.

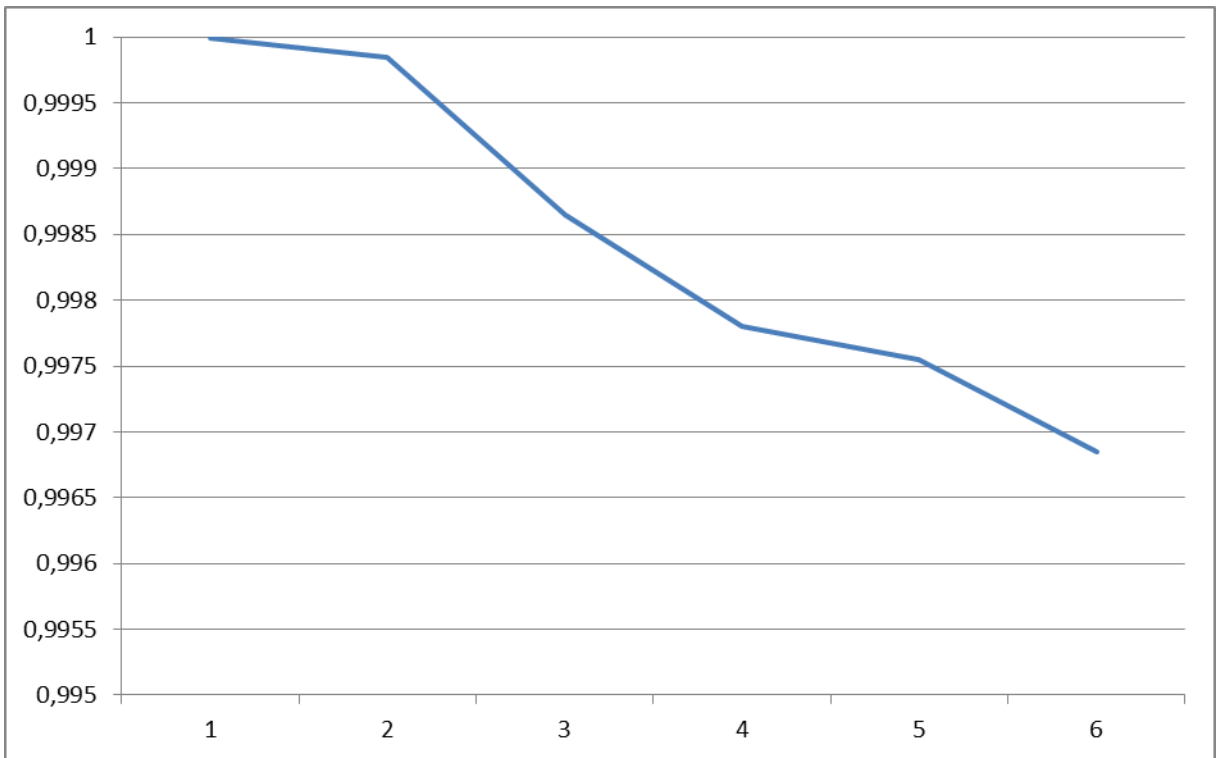


Рис. 4.4. График зависимости вероятности обнаружения звезды от её звёздной величины

Приведённые оценки чувствительности позволяют сделать вывод: матрица фотоприёмника способна обнаруживать звёзды до шестой величины с достаточно высокой вероятностью и данная величина является для матрицы предельной с точки зрения обеспечения характеристик обнаружения, что удовлетворяет требованиям текущего ТЗ.

4.3 Оценка погрешности измерения координат звёзд СКД.

Суммарная погрешность определения координат звёзд в СКД включает следующие составляющие:

- случайную погрешность определения координат звёзд в системе координат ФППЗ;

- систематическую погрешность определения координат звёзд в СКД.

Под случайной составляющей погрешности измерения координат звёзд в системе координат ФППЗ понимается составляющая, зависящая случайным образом от положения изображения звёзд в фоточувствительной плоскости ФППЗ, от положения центров изображений звёзд относительно элементов ФППЗ, перемещения изображения за время накопления, а также суммарную шумовую погрешность, обусловленную в общем случае:

- величиной дробового (флуктуационного) шума сигнала от звезды и фона;

- величиной темнового шума ФППЗ (пороговой экспозиции);

- величиной шума, обусловленного неравномерностью чувствительности ФППЗ;

- величиной шума, обусловленного схемой управления и аналоговой обработки сигнала (приведённой ко входу усилителя);

- погрешностью дискретизации накопленных сигналов в элементах ФППЗ при их оцифровке (дискретностью АЦП).

Под систематической составляющей погрешности измерения координат звёзд в СКД, связанной с базовыми плоскостями АД, понимается суммарная составляющая погрешностей, постоянных или медленно меняющихся во времени в зависимости от влияния факторов условий эксплуатации и определённым образом зависящих от положения звёзд в поле зрения АД; то есть систематическая составляющая учитывает отличие реальной приборной системы координат от расчётной. Систематическая составляющая включает в

себя, в том числе, постоянные погрешности определения паспортных параметров АД и погрешности, связанные с изменением геометрических параметров конструкции оптического блока АД в условиях эксплуатации.

Целью проведённых исследований и расчётов является подтверждение выполнимости требований ТЗ, ограничивающих «случайную нестабильную составляющую погрешности ЗП» величиной ± 20 угловых секунд.

Под погрешностью ориентации ПСК ЗП (АД) понимается угловое смещение координат звёзд (α , β) вокруг его измерительных осей ($X_{\text{пск}}$, $Y_{\text{пск}}$), как систематическое, вызванное остаточными погрешностями паспортизации датчика, так и медленно меняющееся, вызванное воздействием внешних возмущающих факторов. Поскольку систематическая составляющая погрешности принципиально выявляется при юстировке целевой аппаратуры - ЦА (в сумме с другими систематическими составляющими механического интерфейса АД), а случайная («шумовая») составляющая эффективно подавляется алгоритмами обработки данных АД в БЦВС, именно медленно меняющаяся составляющая является основным источником погрешности определения ориентации ПСК АД на моменты астрокоррекции между сеансами юстировки ЦА.

Задача определения ориентации ПСК АД относительно инерциального пространства с требуемой точностью реализуется совместной работой:

- а) АД – определение угловых координат α и β направлений на звёзды в ПСК АД с использованием данных наземной паспортизации АД;
- б) БЦВС – осуществление алгоритмических операций по осреднению полученных от АД координат α и β и расчёту на их основе ориентации ПСК АД относительно инерциального пространства.

Основными источниками погрешности определения угловых координат α и β относительно ПСК АД являются:

- а) погрешности оптической системы АД;
- б) погрешности взаимной геометрической увязки оптической системы, фотоприёмника и посадочного места АД, материализующего ПСК АД;

в) погрешности определения координат изображений звёзд в системе координат фотоприёмника АД.

Погрешности а) и б) обусловлены следующими основными факторами:

- погрешности паспортизации
- погрешности, вызванные деформацией конструкции АД;
- от механических воздействий (перегрузок, вибрационных, ударных и акустических нагрузок);
- при изменении температуры элементов конструкции АД;
- в результате старения материалов конструкции АД.

Значения механических воздействий на этапах наземной эксплуатации и выведения на орбиту значительно превышают соответствующие значения при функционировании на орбите, где их воздействие пренебрежимо мало.

Термодеформации конструкции АД вызываются изменением температуры элементов конструкции АД. Эта составляющая медленно меняется в полёте и является основным источником погрешности определения ориентации ПСК АД на моменты астрокоррекции между сеансами юстировки ЦА. По мере накопления статистических данных она может прогнозироваться.

Влияние фактора старения пренебрежимо мало.

Погрешность в) определяется характеристиками фотоприёмника с электронными трактами АД и условиями их работы (радиационные, температурные). Она имеет случайный «шумовой» характер и эффективно подавляется алгоритмами обработки данных АД в БЦВС.

Максимальные значения отдельных составляющих погрешности АД определены по результатам автономных испытаний.

Испытания проводились на точностном стенде с внешним имитатором звезды, отдельно по параметрам α и β , для звёзд яркостью $m_A=1,0$ и $m_A=6,0$. Точностные параметры стенда на порядок выше требуемых точностных характеристик АД.

Каждое значение в таблице 4.5 получено по результатам 60 измерений

(10 различных точек в поле зрения, 6 последовательных кадров), проведённых при нормальных климатических условиях, рассчитаны центрированные среднеквадратические отклонения σ измеренных значений относительно выставленных значений имитатора звезды. В таблице 4.5 представлены предельные значения погрешности АД, полученные как 3σ .

В соответствии с таблицей 4.5 при уменьшении яркости звёзд с $m_A=1,0$ до $m_A=6,0$ центрированное среднеквадратическое отклонение σ определения координат звёзд увеличивается в 2-3 раза. Максимальное значение его среди всех его вариантов составляет $\sigma_{\Delta\alpha\beta}=9,82''$.

Определение ориентации по данным АД производится в БЦВС при наличии в кадре n звёзд: от 4 (алгоритмическое ограничение) до 15 (максимум для АД).

Полагая случайные погрешности определения координат звёзд взаимно независимыми, имеем для одного кадра:

$$\sigma_{\Delta\text{ориент.}}^* = \frac{\sigma_{\Delta\alpha\beta}}{\sqrt{n}}$$

Для худшего случая ($n=4$):

$$\sigma_{\Delta\text{ориент.}}^* = 4,91''$$

Сеанс астрокоррекции построен таким образом, что её результат формируется в БЦВС на момент окончания сеанса с накоплением и обработкой данных, полученных по N кадрам АД.

Следовательно:

$$\sigma_{\Delta\text{ориент.}} = \frac{\sigma_{\Delta\text{ориент.}}^*}{\sqrt{N}}$$

Для стандартного количества кадров в сеансе ($N=45$):

$$\sigma_{\Delta\text{ориент.}} = 0,733''.$$

Таким образом, остаточная (после обработки в БЦВС данных АД) погрешность определения ориентации, обусловленная случайными погрешностями АД составит $2,2''$ на уровне 3σ .

Проведено вычисление средних значений измеренных погрешностей (математических ожиданий) после воздействия различных внешних возмущающих факторов.

Результаты приведены в таблице 4.6. Порядок следования строк в таблице соответствует порядку осуществления воздействий и последующих замеров.

Таблица 4.5

Предельные значения случайной «шумовой» составляющей погрешности АД

Номер измерения	$3\sigma_{\Delta\alpha}, \text{угл.сек}$		$3\sigma_{\Delta\beta}, \text{угл.сек}$	
	$m_A=1,0$	$m_A=6,0$	$m_A=1,0$	$m_A=6,0$
1	11,91	16,80	16,94	26,42
2	13,48	27,28	13,86	26,76
3	11,14	22,49	11,02	23,90
4	10,40	26,93	12,80	24,52
5	14,85	22,17	10,56	20,55
6	11,97	27,47	14,87	29,45
7	17,24	24,25	9,70	25,06
8	8,10	24,25	14,62	24,74
9	13,99	12,06	10,58	16,64
10	10,28	24,90	9,70	24,27
11	9,20	10,16	14,17	25,96
12	15,53	25,21	12,62	23,41
13	8,03	23,40	8,81	22,84
14	7,38	25,65	13,35	20,82
15	6,65	21,84	5,87	18,37
16	8,83	28,68	14,30	29,30
17	5,86	20,29	12,23	26,21
18	11,90	20,97	11,94	23,57

Средние значения измеренных погрешностей (математические ожидания после воздействия различных внешних возмущающих факторов).

Внешние возмущающие факторы	$\Delta\alpha_{cp}, \text{угл.сек}$		$\Delta\beta_{cp}, \text{угл.сек}$	
	$m_A=1,0$	$m_A=6,0$	$m_A=1,0$	$m_A=6,0$
1. Нормальные условия	1,737	-1,42	-1,99	0,74
2. Термовакuumные (при T = -15°C и +35°C)	4,90	1,23	-0,70	-2,55
3. Вибрационные	6,57	1,53	-15,63	-14,32
4. Ударные	3,42	0,33	-4,34	-2,54
5. Акустические	4,22	0,37	-4,08	-0,18

4.3.1. Оценка случайной составляющей погрешности определения положения звёзд в системе координат ФППЗ (Бх(случ.), Бу(случ.)), угл. с.

Координатами положений изображений звёзд в фоточувствительной плоскости ФППЗ являются координаты энергетических центров изображений по осям X', Y', определяемых по формуле:

$$X_0 = P \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m i \cdot U_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m U_{ij}},$$

где P – период (элемент разложения) матрицы по оси, вдоль которой определяется координата изображения;

U_{ij} - сигнал ij-го элемента матрицы.

Случайные погрешности определения координат звёзд включают следующие составляющие:

- СКО, обусловленное влиянием суммарного шума фотоэлектронного тракта АД (Бх(Уш), Бу(Уш));

- СКО, обусловленное влиянием неравномерности чувствительности ФППЗ на сигнал от звезды ($\sigma_x(s)$, $\sigma_y(s)$);

- СКО, обусловленное влиянием алгоритмической погрешности измерения координат $\sigma_x(\text{случ.})$, $\sigma_y(\text{случ.})$.

Для оценки случайной составляющей погрешности принят наихудший, с точки зрения обеспечения точности, вариант симметричного положения изображения относительно элементов ФППЗ. В этом случае сигнал в элементе от неподвижного изображения звезды составляет примерно 0,25 от суммарного сигнала в изображении.

СКО, обусловленное влиянием суммарного шума фотоэлектронного тракта АД для одного кадра накопления, угл. сек.

В таблице 4.7 приведены значения СКО, обусловленного влиянием суммарного шума фотоэлектронного тракта АД для номинальных параметров в зависимости от фокусного расстояния оптической системы и величины фоновой засветки для одного кадра накопления.

Таблица 4.7.

$f', \text{ мм}$		52	
$t_{\text{нак}}$	m_a	$E_{\text{ф}}, \text{ лк}$	
		0	0,01
0,01 с	-0,5	0,04	0,05
	0,0	0,04	0,06
	+1,0	0,10	0,13
	+2,0	0,19	0,24
	+3,0	0,34	0,51
	+4,0	0,75	1,39
	+4,5	1,32	2,44
	+5,0	1,74	3,21
	+5,5	2,78	5,13
	+6,0	5,35	9,86
0,16 с	-0,5	0,03	0,04
	0,0	0,04	0,04
	+1,0	0,07	0,10
	+2,0	0,13	0,21
	+3,0	0,22	0,39
	+4,0	0,46	1,02
	+4,5	0,80	1,78
	+5,0	1,07	2,39
	+5,5	1,64	3,66
	+6,0	3,20	7,15

Анализ влияния составляющих суммарной погрешности шума показывает достаточную оптимальность выбранных параметров АЦП и аналоговой обработки сигнала. Суммарное СКО погрешностей указанных

параметров примерно в (1.5 - 2) раза меньше СКО, обусловленного фоновой составляющей. Однако указанное суммарное СКО примерно на порядок превышает флуктуационную составляющую сигнала, что приводит, при отсутствии фоновой засветки, к подавляющему влиянию суммарного СКО, обусловленного дискретностью АЦП и аналоговой обработки сигнала.

Влияние шумовой составляющей, обусловленной перемещением изображения в фоточувствительной плоскости ФППЗ ($\sigma_x(v)$, $\sigma_y(v)$), на суммарную шумовую составляющую достаточно слабо: величины ($3\sigma_x(v)$, $3\sigma_y(v)$) не превышают 0.5" при осреднении по 4-м кадрам визирования. Слабое влияние $\sigma_x(v)$, $\sigma_y(v)$ обусловлено тем, что суммарный сигнал в изображении за время кадра накопления практически не зависит от наличия (и скорости) перемещения. При этом флуктуационная составляющая сигнала в элементе изображения не является влияющей по сравнению с другими составляющими (например, фоновой засветкой).

Оценка СКО, обусловленного влиянием алгоритмической погрешности измерения координат ($\sigma_x(X_0)$, $\sigma_y(Y_0)$)

Алгоритмическая погрешность – это систематическая погрешность определения положения изображений в системе координат ФППЗ. К этой группе относятся погрешности, зависящие от положения в поле зрения АД и от положения относительно элементов ФППЗ.

При оценках вклада алгоритмических погрешностей ΔX_0 , ΔY_0 в суммарные погрешности измерений принимаем, что:

- средние по полю зрения значения смещений ΔX_0 , ΔY_0 энергетического центра изображения, соответствующие положению изображения в центре поля зрения, при паспортизации АД будут включены в паспортные параметры и практически не повлияют на точность измерений координат;

- при равновероятном попадании изображения звезды на любой

участок поля зрения и относительно элементов ФППЗ, закон распределения погрешностей будет близок к равномерному.

С учётом сказанного расчётные оценки СКО погрешностей за счёт смещения ΔX_0 , ΔY_0 определяются как:

$$\sigma_{X_0} = \frac{\Delta X_0^{max}}{2\sqrt{3}}; \quad \sigma_{Y_0} = \frac{\Delta Y_0^{max}}{2\sqrt{3}}$$

где:

ΔX_0^{max} ; ΔY_0^{max} – максимальные расчётные значения смещений

энергетического центра изображения на краю поля зрения АД при наихудшем положении изображения относительно элементов ФППЗ.

Составляющие алгоритмической погрешности:

- влияние дискретной структуры матрицы ФППЗ.

Величина этой составляющей определяется положением изображения относительно элементов матрицы. При вычислении координат энергетического центра эта составляющая равна нулю при симметричном положении изображения относительно центра элемента и является максимальной при симметричном положении относительно пересечения элементов матрицы ФППЗ. Предельная погрешность влияния алгоритма вычисления координат энергетического центра составляет приблизительно 0.1 от размера элемента;

- влияние перемещения изображения. Обусловлено искажением распределения сигнала в изображении звезды за счёт геометрических смещений центра изображения за время кадра накопления на момент времени измерения. В случае, если момент измерения соответствует середине кадра накопления, существенно уменьшается. Если при этом перемещение равномерно, данная погрешность минимальна и не превышает 0,3";

- влияние неэффективности переноса заряда. Результаты оценок и математического моделирования показывают, что максимальные значения смещений энергетического центра за счёт неэффективности составляют:

$$\Delta X_{\varepsilon} = \Delta Y_{\varepsilon} = 1.5''$$

- Влияние размера поля зрения АД. Одним из основных факторов, ограничивающих точностные характеристики АД с большим полем зрения, является увеличение погрешностей измерений координат по полю зрения за счёт влияния геометрической и «энергетической» дисторсий объектива. Под «энергетической» дисторсией в данном случае понимаются искажения освещённости в изображении звезды на матрице ФППЗ по сравнению с изображением звезды в центре поля зрения.

Такие искажения приводят к вытягиванию формы пятна рассеивания в одном направлении и к появлению асимметрии распределения освещённости в пятне, что в свою очередь, вызывает смещение энергетического центра изображения звезды относительно его геометрического центра и соответствующие погрешности измерений.

Также имеют место хроматические aberrации, которые особенно влияют на суммарную погрешность в связи с широким диапазоном и разнообразием спектральных классов визируемых звёзд.

По расчётным оценкам предельные величины погрешностей без специальной коррекции искажения объектива могут составлять до (3-5)" на краю поля зрения (10x10) угл.град., что соответствует СКО в зависимости от положения в поле зрения до (1-1.5)". Это же значение можно отнести к случаю нахождения 3-х или более звёзд за счёт осреднения координат по их различному положению в поле зрения.

На основании вышеизложенного представляется целесообразным проведение на этапе настройки АД индивидуальной паспортизации систематических погрешностей измерения, вызываемых суммарным действием геометрической и "энергетической" дисторсий оптической системы объектива, и последующий учет этих паспортизованных погрешностей при измерениях координат на ФППЗ, что позволит обеспечить СКО по положению в поле зрения указанной составляющей на уровне $\leq 1"$, даже при увеличении размера поля зрения до (15 x 15) угл.град.

Возможность такой паспортизации и учета рассматриваемых систематических погрешностей подтверждает также анализ различной научно-технической информации.

Однако, для дальнейших оценок приняты значения СКО алгоритмической погрешности с учетом искажений на краю соответствующего поля зрения без их паспортизации (см. табл. 4.8). Влияние паспортизации на величину алгоритмической погрешности должна быть оценена на последующих этапах работы.

Таблица 4.8

$f', \text{мм}$	52
$\sigma_x(X_0), \sigma_y(Y_0), \text{угл. сек.}$	2,5

4.3.2. Оценка систематической составляющей погрешности изменения координат ($\sigma_x(\text{сист.}), \sigma_y(\text{сист.})$), угл. сек.

Погрешности, определяемые ниже – это систематические или медленно меняющиеся во времени погрешности привязки системы координат ФППЗ к СКД, в том числе, с учётом эксплуатации.

Погрешности определения паспортных параметров АД

Для обеспечения точностных характеристик АД необходимы паспортизация и учет при определении координат ряда систематических погрешностей, возникающих при изготовлении, сборке и юстировке АД.

Определение паспортных параметров проводится на оптическом стенде с имитаторами звезды, после сборки и юстировки АД. Методика определения паспортных параметров предполагает проведение достаточно большого количества измерений координат изображений имитатора звезды на матрице ФППЗ (с целью уменьшения случайной составляющей определения паспортных параметров), сравнение измеренных значений координат с расчетными, задаваемыми на стенде, и преобразование полученных рассогласований в оценки паспортных параметров. Точность паспортизации

АД по такой методике будет определяться погрешностями оптического стенда, случайными погрешностями АД при измерении координат, составом и количеством измерений, проводимых по методике паспортизации.

При определении паспортных параметров α_0 , β_0 целесообразно рассмотреть способ измерений координат изображений имитатора звезды в СКД двумя приемами - в двух положениях оптического блока, отличающихся разворотом вокруг визирной оси АД на 180 угл.град. В этом случае исключается влияние на оценки параметров α_0 , β_0 погрешностей задания (аттестации) углового положения визирной линии имитатора звезды относительно посадочного места стенда.

Для определения паспортных параметров $e(x)$, $e(y)$, C в конструкции стенда необходимо предусмотреть устройство для точного контролируемого углового перемещения визирной линии имитатора на максимально большой угол в пределах поля зрения АД с погрешностью отсчета углового положения не более (0.4 - 0.5)". Возможно использование варианта с многоточечным имитатором, при этом должны быть аттестованы углы между визирными линиями опорных излучателей с погрешностью, не более указанной.

С учетом изложенного, предварительные оценки суммарного вклада погрешности паспортизации (всех паспортных параметров) в погрешность измерений координат звезд на краю поля зрения (15 * 15) угл.град. (при числе измерений каждого паспортного параметра не менее 10 - 20), составит не более:

$$\Delta\alpha_0^{max} = \Delta\beta_0^{max} = 2.5'' (\sigma_{\alpha_0} = \sigma_{\beta_0} = 0.8'');$$

$$\Delta C = 15''; (\sigma_{\beta_0} = 5.0'');$$

погрешность измерений за счет погрешности паспортизации масштаба $\Delta e(x)$, $\Delta e(y)$ (паспортный параметр f3):

Нэл. * $\Delta e(x) = 3.0''$ на краю поля зрения (15 * 15) угл.град., $\Delta e(y) = 0.5''$ в зоне (+/-2 * +/- 2) угл.град., что приводит к ошибке измерений углового

положения звезды за счет погрешности определения паспортного параметра f_3 не более 3" на краю поля зрения (15 x 15) угл.град.

Приведенные оценки точности паспортизации параметров должны быть в дальнейшем уточнены после разработки методики паспортизации, определения точностных характеристик стенда и уточнения случайных погрешностей АД с учетом, в том числе, экспериментальных данных.

Оценка максимальной суммарной систематической погрешности

Величина суммарной систематической погрешности определяется следующим образом:

$$\Delta\alpha_{(сист)} = \Delta\alpha_0 + \Delta K_0 \cdot \operatorname{tg}\alpha + \Delta C \cdot y + \Delta\alpha_{(нест)} + \Delta K_{(нест)} \cdot \operatorname{tg}\alpha + \Delta\alpha_{(t)} + \Delta\alpha_{(\Delta t)},$$

где:

$\Delta\alpha_0$ ($\Delta\beta_0$), ΔK_0 , ΔC - погрешности определения паспортных параметров и масштаба изображения;

$\Delta\alpha_0$ ($\Delta\beta_0$), $\Delta K_{нест.}$ - величины нестабильности углового положения визирной линии АД и масштаба изображения за время эксплуатации, в том числе, за счет влияния механических воздействий;

$\Delta\alpha(t)$, $\Delta\beta(t)$ - погрешность измерений за счёт влияния изменения среднего уровня температур в рабочем диапазоне;

$\Delta\alpha(\Delta t)$, $\Delta\beta(\Delta t)$ - погрешность измерения за счет влияния перепада температур по корпусу объектива оптического блока.

Выражение для $\Delta\beta_{(сист)}$ аналогично.

В предположении взаимной независимости и случайного характера (по совокупности условий паспортизации и эксплуатации) указанных составляющих (за исключением систематических погрешностей за счет влияния температуры) максимальное значение систематической составляющей погрешности АД можно определить следующим образом:

$$\Delta\alpha_{(сист)} = \Delta\alpha(t) + \Delta\alpha(\Delta t) + 3\sqrt{\sigma_{\alpha 0}^2 + \sigma_{k 0}^2 \cdot \operatorname{tg}^2\alpha + \sigma_c^2 \cdot y^2 + \sigma_{\Delta\alpha(нест)}^2 + \sigma_{\Delta k(нест)}^2 \cdot \operatorname{tg}^2\alpha}.$$

4.3.3. Оценка суммарной погрешности определения координат звезд в СКД ($\Delta\alpha_{\Sigma}$, $\Delta\beta_{\Sigma}$). Оценка влияния параметров АД на суммарную погрешность

Суммарные расчетные погрешности $\Delta\alpha_{\Sigma}$, $\Delta\beta_{\Sigma}$ определения координат звезд в СКД, связанной с установочными базами оптического блока, определяется суммой случайной и систематической составляющих погрешности. Максимальные значения суммарной погрешности $\Delta\alpha_{\Sigma}$, $\Delta\beta_{\Sigma}$ можно определить по формуле:

$$\Delta\alpha_{\Sigma}^{max} \left(\Delta\beta_{\Sigma}^{max} \right) = \sqrt{[3\sigma_{сл}]^2 + [3\sigma_{сист}]^2}$$

Расчетные оценки $\Delta\alpha_{\Sigma}$, $\Delta\beta_{\Sigma}$ для одного кадра накопления и номинальных параметров АД приведены в таблице 4.9. Зависимость суммарных погрешностей от числа кадров накопления при фоновой засветке $E_{\phi} = 0.01$ лк приведена в таблице 4.10.

Суммарные расчётные погрешности определения координат звёзд в СКД для одного кадра накопления в зависимости от величины фоновой засветки, угл.сек (номинальные параметры).

Таблица 4.9

f' , мм		52	
$t_{\text{нак}}$	m_a	E_{ϕ} , лк	
		0	0,01
0,01 с	+4,5	12,1	13,6
	+5,0	12,6	15,0
	+5,5	14,2	19,2
	+6,0	19,7	31,7
0,16 с	+4,0	11,5	11,8
	+4,5	11,7	12,6
	+5,0	11,9	13,5
	+5,5	12,4	15,9
	+6,0	15,0	24,3

Зависимость суммарной погрешности определения координат от числа кадров накопления для $E_{\phi}=0,01$ лк, угл.сек

Таблица 4.10

$f', \text{ мм}$		52	
$t_{\text{нак}}$	mv	$E_{\text{ф}}, \text{ лк}$	
		2 кадра	4 кадра
0,01 с	+4,0	10,3	9,2
	+4,5	11,2	9,7
	+5,0	12,0	10,2
	+5,5	14,7	11,8
	+6,0	23,2	17,3
0,16 с	+4,0	10,1	9,1
	+4,5	10,6	9,4
	+5,0	11,1	9,7
	+5,5	12,6	10,5
	+6,0	18,1	14,0

Погрешность определения координат звезд на этапе ПСИ включает случайную составляющую (см. табл. 4.5) и погрешности определения паспортных параметров. Учитывая вклад паспортных параметров в погрешность определения координат (формулы представлены в примечании), суммарная погрешность $\Delta\alpha_{\Sigma}, \Delta\beta_{\Sigma}$ на этапе ПСИ для звезды с $mv = 6$ при фоновой засветке 0.01 лк составляет (5 - 7)" в зависимости от числа кадров накопления (осреднения погрешности).

Ошибки координат представляются суммой трёх составляющих:

$$\Delta = \Delta_{\text{сист}} + \Delta_{\text{пер}} + \Delta_{\text{шум}}, \quad (3)$$

где $\Delta_{\text{сист}}$ – систематическая ошибка, обусловленная в основном завышенной тактовой частотой работы ФППЗ по сравнению с требованиями ТЗ,

$\Delta_{\text{пер}}$ – периодическая ошибка, представляющая собой гармоническое колебание с периодом, равным размеру пикселя,

$\Delta_{\text{шум}}$ – шумовая (случайная) ошибка.

Систематические ошибки по координатам x, y :

$$\Delta X_{\text{сист}} = \Delta X_{\text{сист}}^{\text{max}} \cdot \frac{(X - 1024)^2}{F^2}; \Delta Y_{\text{сист}} = \Delta Y_{\text{сист}}^{\text{max}} \cdot \frac{(Y - 1024)^2}{F^2},$$

где $\Delta X_{\text{сист}}^{\text{max}} = 20$ (диапазон изменения: 0...30), что даёт

$$\Delta X_{\text{сист}} = 0,25 = 23 \text{ угл. сек. при } |x-1024|=1012,$$

$$\Delta Y_{\text{сист}}^{\text{max}} = -10 \text{ (диапазон изменения: } -20 \dots 0),$$

x, y – точные значения координат звезды на матрице ФППЗ,
 $10,0 < x < 1014,0; 10,0 < y < 1014,0,$

Периодические ошибки по координатам x, y :

$$\Delta X_{\text{пер}} = \Delta X_{\text{пер}}^{\text{max}} \cdot \sin 2\pi x; \Delta Y_{\text{пер}} = \Delta Y_{\text{пер}}^{\text{max}} \cdot \sin 2\pi y,$$

где $\Delta X_{\text{пер}}^{\text{max}} = 0,2$ (диапазон изменения: $0 \dots 0,3$),

$$\Delta Y_{\text{пер}}^{\text{max}} = 0,05 \text{ (диапазон изменения: } 0 \dots 0,15).$$

Шумовая ошибка по каждой координате представляет случайную величину с нулевым мат. ожиданием и среднеквадратичным отклонением, зависящим от блеска звезды в первом приближении линейно:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 m_{\text{пр}},$$

где $m_{\text{пр}}$ - приборная звездная величина (из каталога).

$$\sigma_1 = 0,03 \text{ (диапазон изменения: } 0 \dots 0,10),$$

$$\sigma_1 = 0,05 \text{ (диапазон изменения: } 0 \dots 0,10) \text{ для } m_{\text{пр}} > 0.$$

Для $m_{\text{пр}} < 0$ $\sigma_2 = 0$.

Исходя из табличных данных по систематической и случайной составляющим погрешности определения координат звёзд в СКД, можно сделать вывод о максимальной суммарной погрешности. Используя формулу (3), убедимся, что суммарная составляющая не превышает норму, установленную ТЗ. Суммарная составляющая равна $\pm 20''$

Таким образом, испытаниями и прямыми прецизионными измерениями погрешностей АД в наземных условиях, подтверждена выполнимость требований ТЗ по случайной нестабильной составляющей погрешности ориентации визирной системы координат, обусловленной ЗП ($\pm 20''$).

Примечание (алгоритм вычисления центроиды в АД):

$$\alpha_{изм} = -\arctg\left[\frac{(x'-a) \cdot \cos C + (y'-b) \cdot \sin C}{f_3'}\right] - \alpha_0$$

$$\beta_{изм} = -\arctg\left[\frac{(y'-b) \cdot \cos C + (x'-a) \cdot \sin C}{f_3'}\right] - \beta_0$$

4.4 Расчетные оценки по выбору поля зрения АД

4.4.1 Поле зрения АД

Стоит задача ограничить количество звёзд в каталоге некими разумными рамками, то есть определить необходимую пороговую чувствительность АД, которая позволит комфортно работать в любом пространстве. Все пересчитанные звёзды определённым образом и с различной плотностью расположены в инерциальном пространстве.

Излучение от звезды проходит через оптику прибора и попадает на матрицу. Предельное положение звезды, которое может восприниматься матрицей, определяется геометрическими размерами матрицы.

Если b – размер 0,5 матрицы, f – фокус, то поле зрения определяется:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{f}.$$

При большом поле зрения не требуется большей чувствительности для распознавания и астроориентации. Однако существует технологическая тонкость, связанная с диаметром объектива. Объектив с большим диаметром собирает от звезды больший поток, т.е. больше $\Phi_{зв}$ и тем лучше прибор чувствует звезду. При изготовлении объектива существует предельное отношение d/f . Т.е. с одной стороны, выгодно иметь больший диаметр объектива, а с другой мы не можем увеличить его, упираясь в технологию изготовления.

4.4.2 Обоснование оптимального поля зрения астродатчика

Оптимальное поле зрения ищем, исходя из того, чтобы для матрицы были наименьшие требования по чувствительности, необходимой для обеспечения требуемой зависимости пороговой приборной звёздной величины от размера поля зрения. Пусть U_n – отклик прибора для пороговой звезды с приборной звёздной величиной m_a , а U_0 – отклик прибора для некоторой звезды с приборной звёздной величиной m_0 . Тогда имеем

$$m_a - m_0 = -2,5 \cdot \lg \frac{U_n}{U_0}. \quad (4.24)$$

Отклик U_0 представляется как

$$U_0 = h \cdot D^2, \quad (4.25)$$

где D – диаметр объектива;

λ - длина волны;

$T(\lambda)$ - инструментальная кривая прибора;

$E_0(\lambda)$ - спектральная плотность энергетической освещенности

вспомогательной звезды;

k – коэффициент, приводящий энергетический поток от звезды в сигнал U_0 ;

$$h = \frac{\pi}{4} \cdot k \int_0^\infty T(\lambda) \cdot E_0(\lambda) d\lambda.$$

Наименьшие требования по чувствительности для матрицы эквивалентны наименьшему значению коэффициента k среди размеров полей зрения R , при которых на одном и том же фиксированном пороге U_n обеспечивается достижение требуемой пороговой приборной звездной величины m_n . Из (4.24) и (4.25) следует:

$$h = a^C \cdot a^{m_a - 5 \lg D}, \quad (4.26)$$

где константы a, C представляются как $a = 10^{0,4}$, $C = 2,5 \lg U_n - m_0$.

Пусть D связано с фокусом объектива f соотношением $D = A \cdot f$. Исходя из связи фокуса f с размером матрицы b :

$$f = \frac{b}{2 \cdot \operatorname{tg} R},$$

получаем:

$$D = \frac{A \cdot b}{2 \cdot \operatorname{tg} R}.$$

Подставляя данное выражение в (4.26), получаем:

$$h = W \cdot a^{m_a + 5 \cdot \lg [\operatorname{tg} R]},$$

где $W = a^{C - 5 \cdot \lg \frac{A \cdot b}{2}}$.

Параметры A, b полагаем фиксированными для различных размеров R поля зрения. В этом случае W – также константа для различных R . Так как $a > 1$, то минимум k, h наступает при минимуме функции $y = m_n(R) + 5 \cdot \lg[\operatorname{tg} R]$. На рисунке 4.5 представлена зависимость $m_n = m_n(R)$. На рисунке 4.6 представлена зависимость $y = y(R)$.

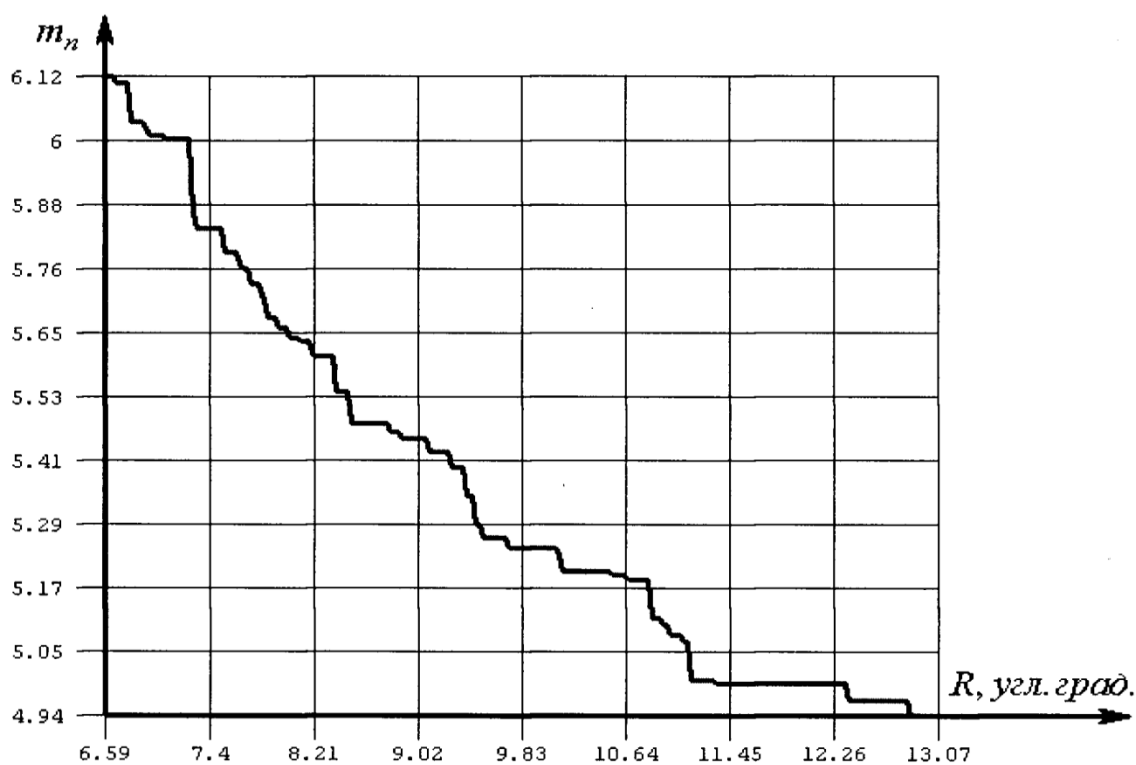


Рисунок 4.5 – Зависимость требуемой пороговой приборной звездной величины m_n от радиуса R кругового поля зрения.



Рисунок 4.6 – Зависимость $y = y(R)$.

Минимум функции y достигается при $R^* = 8,5^0$.

В этом случае для матрицы обеспечиваются наименьшие требования по чувствительности (параметр k наименьший среди остальных R).

Коэффициент ρ , показывающий во сколько надо увеличить чувствительность на матрице при размере R по сравнению с чувствительностью на размере R^* , представляется как

$$\rho = \frac{h(R)}{h(R^*)} = \frac{k(R)}{k(R^*)} = a^{y-y(R^*)}, \text{ где } y(R^*) = 1,3519. \text{ Так при } R=12,26^0 \text{ имеем } \rho = 1,36.$$

4.4.3 Расчёт поля зрения АД

Одним из основных эксплуатационных параметров оптико-электронного прибора ориентации КА является угловое поле зрения, определяемое характеристиками объектива.

Угловое поле зрения – это угол между крайними лучами, входящими в объектив прибора и создающими изображение на фотоприемнике.

В настоящее время в приборе ориентации по звездам АД-1 используется отечественная матрица «Каскад-1» и объектив «Лицей». На рис. 4.7 и 4.8 схематично показаны матрицы «Каскад-1» и CCD 47-20.

Определим поле зрения для матрицы E2V CCD 47-20.

$$2\operatorname{tg}\omega = g/f',$$

где ω – угловое поле зрения,

f' – фокусное расстояние объектива «Лицей»

$$f' = 51,9 \text{ мм}$$

g – радиус полевой диафрагмы, а также полудиagonalь кадра

$$g = 25,6 \text{ мм}$$

Отсюда

$$\omega = \operatorname{arctg}(g/2f').$$

Подставим значения и получим: $\omega = \operatorname{arctg}(25,6/2 \cdot 51,9) = 13,85^\circ$.

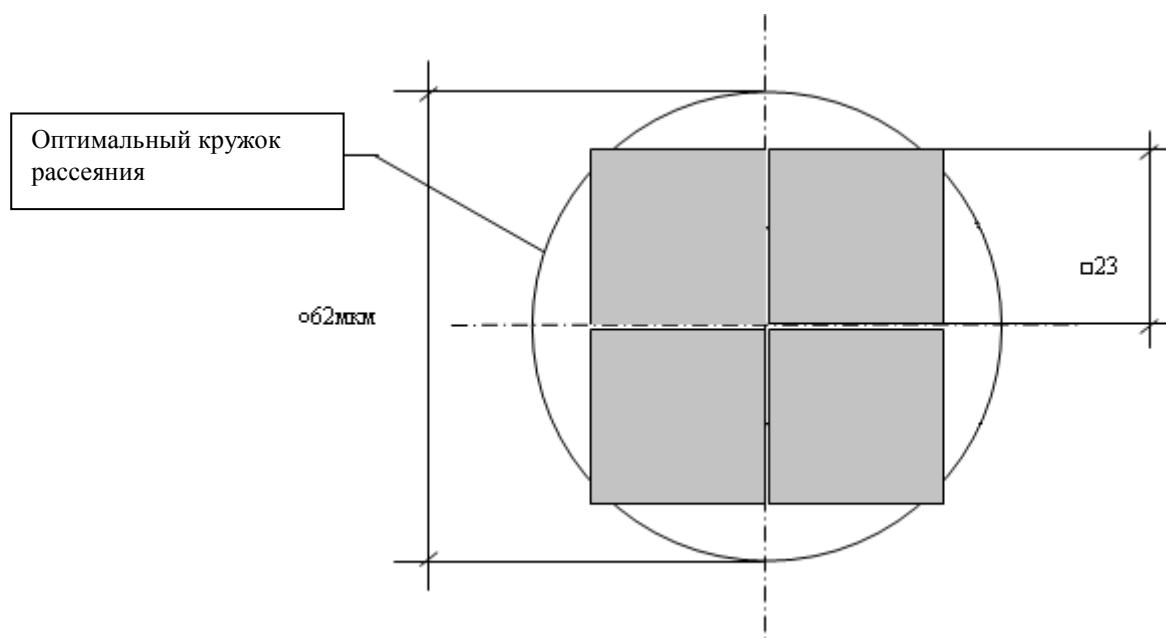
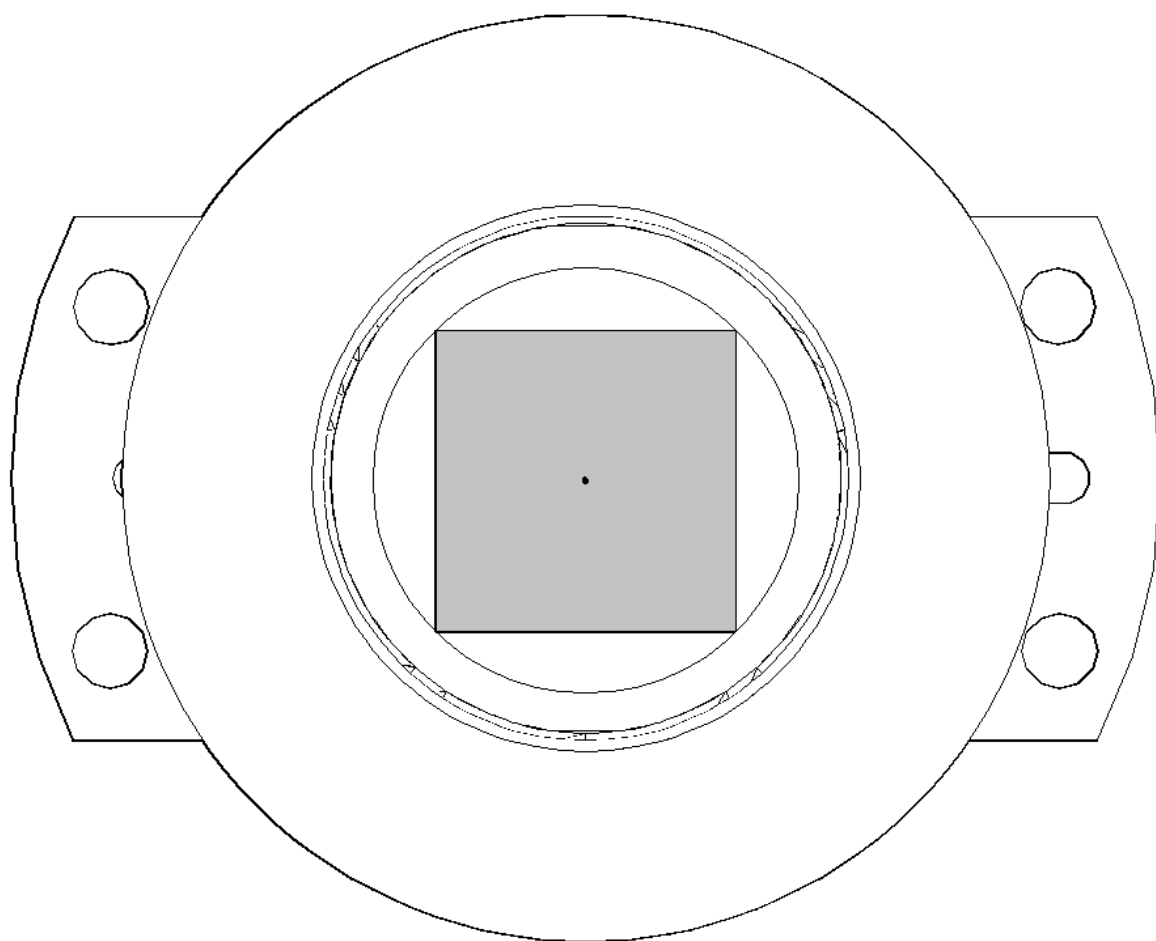
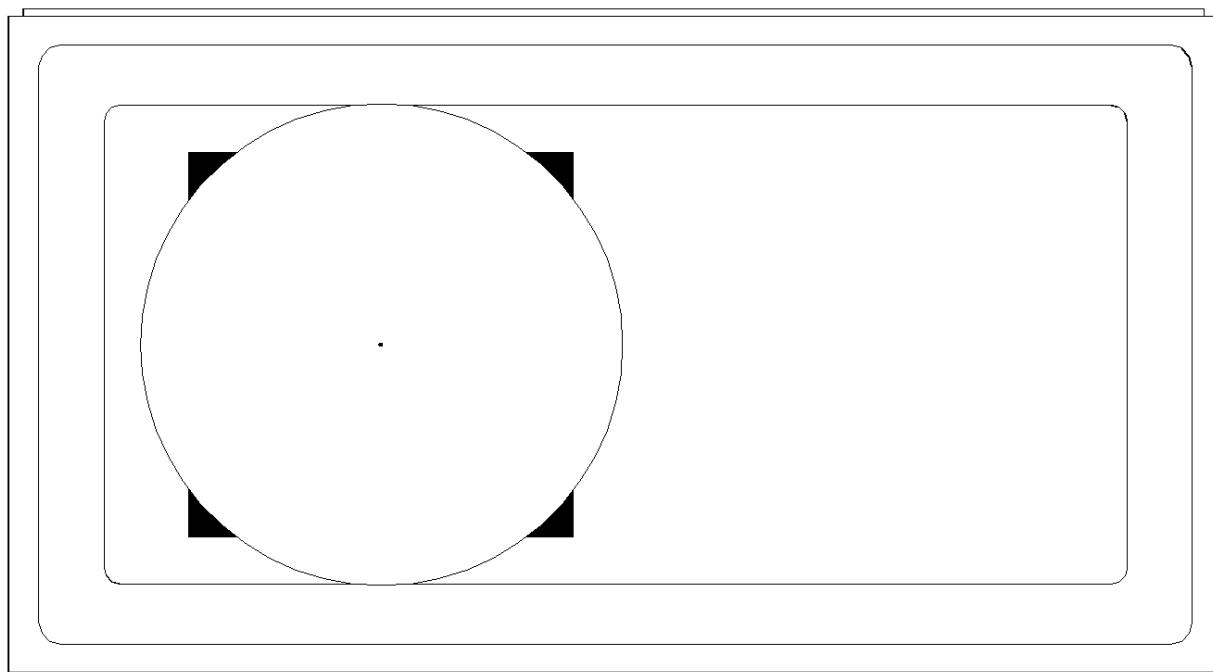


Рис. 4.7 – Изображение матрицы Каскад – 1



Поле зрения описано вокруг матрицы $\omega=13.85^\circ$

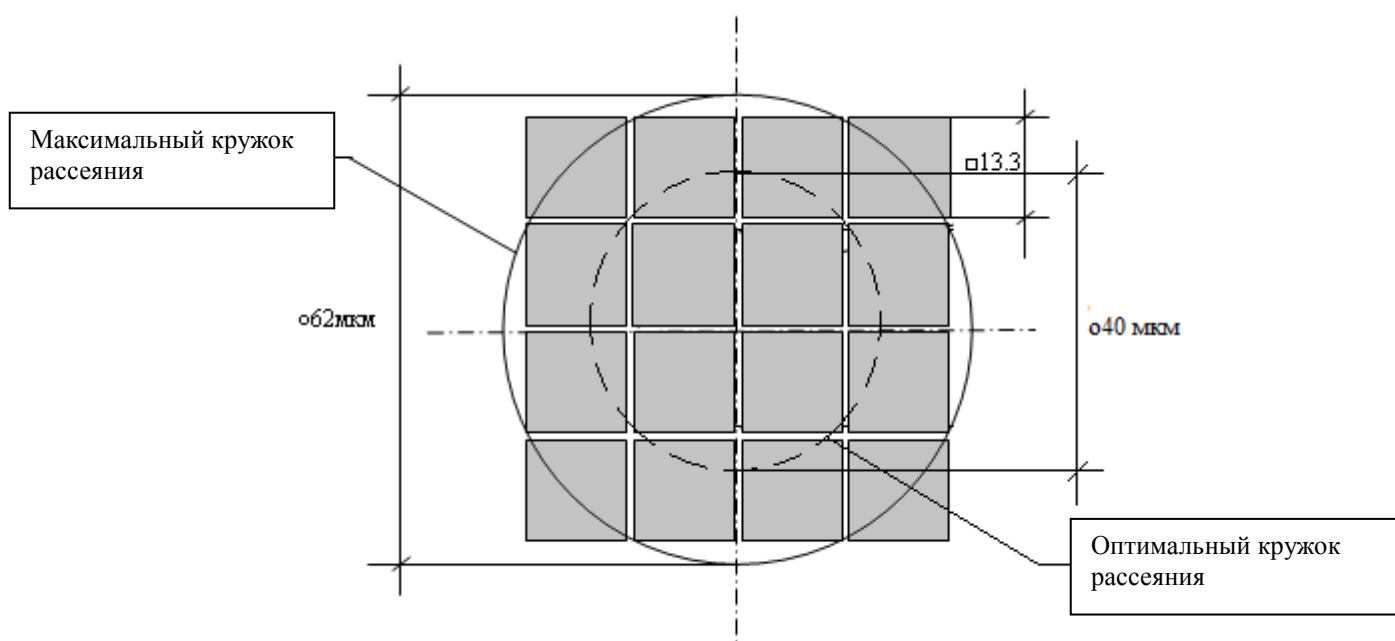


Рис. 4.8 – Изображение матрицы CCD 47-20

4.5 Расчёт числа визируемых звёзд

В основе расчёта лежат две характеристики:

- спектральная реакция матрицы;
- относительное спектральное пропускание оптики.

Спектральная реакция матрицы - это отклик матрицы на излучение потоков, имеющих разные длины волн.

Относительное спектральное пропускание оптики – это отношение, показывающее, какой выходной поток соответствует определённому входящему потоку на определённой длине волны.

Исходя из данных характеристик формируется каталог звёзд в фотометрической системе координат прибора.

Далее имеем некоторое поле зрения – путём компьютерного моделирования с использованием полученного каталога, ось визирования начинает с определённым шагом сканировать небесную сферу. Далее путём компьютерного моделирования с использованием полученного каталога создаётся некое поле зрения, путём сканирования небесной сферы осью визирования с определённым шагом. В соответствии с определённым положением оси визирования звёзды проецируются в окрестность этой оси, предполагая, что радиус поля зрения 7° , т.е. $\omega \approx 14^\circ$.

Небесная сфера – это сфера очень большого радиуса, на которой отображаются полученный данным способом звёзды.

Все звёзды уже пересчитаны в фотометрическую систему и известны их координаты относительно инерциального пространства. Далее берётся воображаемая ось визирования. Далее с определённым мелким шагом происходит сканирование небесной сферы этой осью (см. рис. 4.9). При этом по находящемуся в файле программы каталогу определяются звёзды, попадающие в наше поле зрения при каждом положении оси визирования.

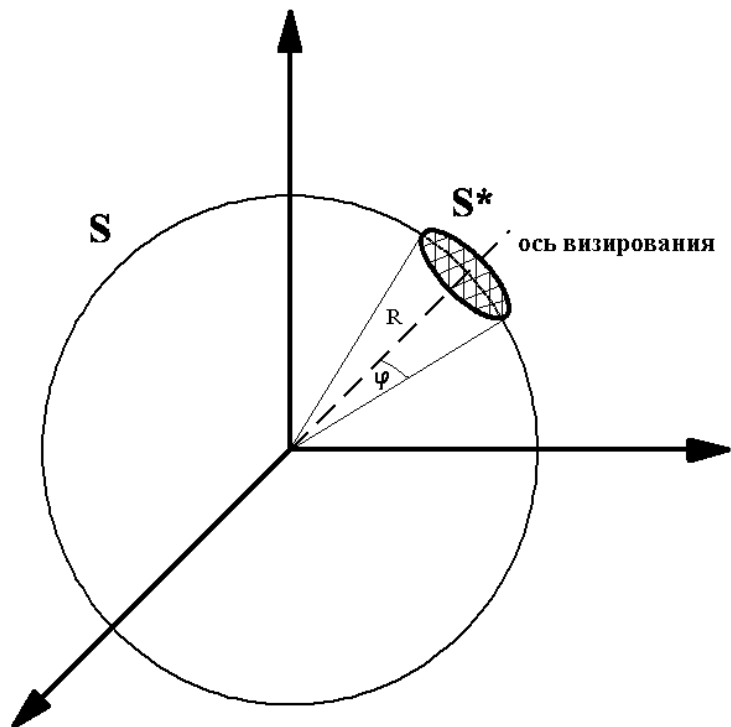


Рис.4.9. Сканирование небесной сферы

Площадь небесной сферы:

$$S=4\pi R^2$$

Площадь части звездного неба, попадающей в поле зрения АД:

$$S=2\pi R^2 \cdot (1-\cos\varphi),$$

где φ - радиус поля зрения.

Среднее число звезд в поле зрения:

$$h=\frac{z}{S} \cdot S^*,$$

где z – количество звезд на небесной сфере.

В каталоге звездного неба, используемого в АД производства ФГУП МОКБ «Марс», используется 4000 звезд.

Подставим и получим:

$$h=\frac{z}{4\pi R^2} \cdot 2\pi R^2 \cdot (1-\cos\varphi)=\frac{z}{2} \cdot (1-\cos\varphi)=2000 \cdot (1-\cos 7^\circ)=14,9 \approx 15.$$

Таким образом в поле зрения попадает 15 звезд.

4.6 Расчёт быстродействия

В соответствии с требованиями ТЗ необходимо в 10 раз увеличить быстродействие разрабатываемого фоточувствительно тракта (с 0,5 Гц до 5 Гц) по сравнению с аналогом. Рассмотрим, за счет чего это можно обеспечить.

а) Выбор матричного фотоприемника с более высокими динамическими характеристиками.

Из НТД на ФПЗС «Каскад1А» и ССД 47-20 в таблице 4.11 приведены динамические параметры

Таблица 4.11

Параметр	ФПЗС	
	Каскад1А	ССД 4720
Период пиксельной частоты, τ мкс	0,6	0,2
Период строчной частоты, t мкс	10,0	7,0 (при переносе в память) 50,0 (при чтении из памяти)
Число строк, n	512 (при бинировании – 256)	1033 (при переносе кадра)
Число столбцов (с учетом пересканирования), m	532	1084 (на один выходной узел) 542 (на 2 выходных узла)
Тип переноса заряда	строчный	кадровый

Из таблицы следует для ФПЗС Каскад 1А/ССД 47-20:

– время считывания строки T_1

$$T_1 = \tau \cdot m = 302/109 \text{ (на 2 вых. узла), мкс}$$

– время переноса строки T_2

$$T_2 = 3 \cdot t \text{ (при бинировании)} / \begin{matrix} t \text{ (при переносе в память)} \\ 2t \text{ (при чтении из памяти (бинированием))} \end{matrix} = 30/100 \text{ мкс}$$

– время переноса кадра T_3

$$T_3 = 2 \cdot T_2 \cdot n = 7,7 / \begin{matrix} 7,3 \text{ (при переносе в память)} \\ 104 \text{ (при бинировании)} \end{matrix} \text{ мс}$$

– время считывания кадра T_4

$$T_4 = T_1 \cdot \frac{n}{2} + T_3 \approx 90/160 \text{ мс}$$

б) Использование приемника с более мелким шагом пикселей.

Это позволяет при юстировке фотоприемника уменьшить диаметра кружка рассеяния (для CCD 47-20 примерно в 2 раза), что приведет к повышению энергетике в пикселе обратно пропорционально площади кружка рассеяния (≈ 4 раза) и, соответственно, сократит время накопления при том же уровне сигнала.

в) Оптимизация управления фотоприемником. Циклограмма работы аналога АД приведена на рисунке 4.10.

Для разрабатываемого в данном проекте астродатчика предлагается изменить циклограмму – рисунок 4.11.

г) Выбор приемника с кадровым переносом, позволяющего совмещать во времени процессы накопления заряда на чувствительной секции ФПЗС и считывания с секции памяти. Что позволяет иметь время накопления в пределах $T_n=150$ мс при длительности кадра 200 мс. Необходимо проверить достаточность чувствительности выбранной ФПЗС при $T_n=150$ мс для самых слабых звезд ($m_a=6,0$ звездной величины) при реализации выше перечисленных решений.

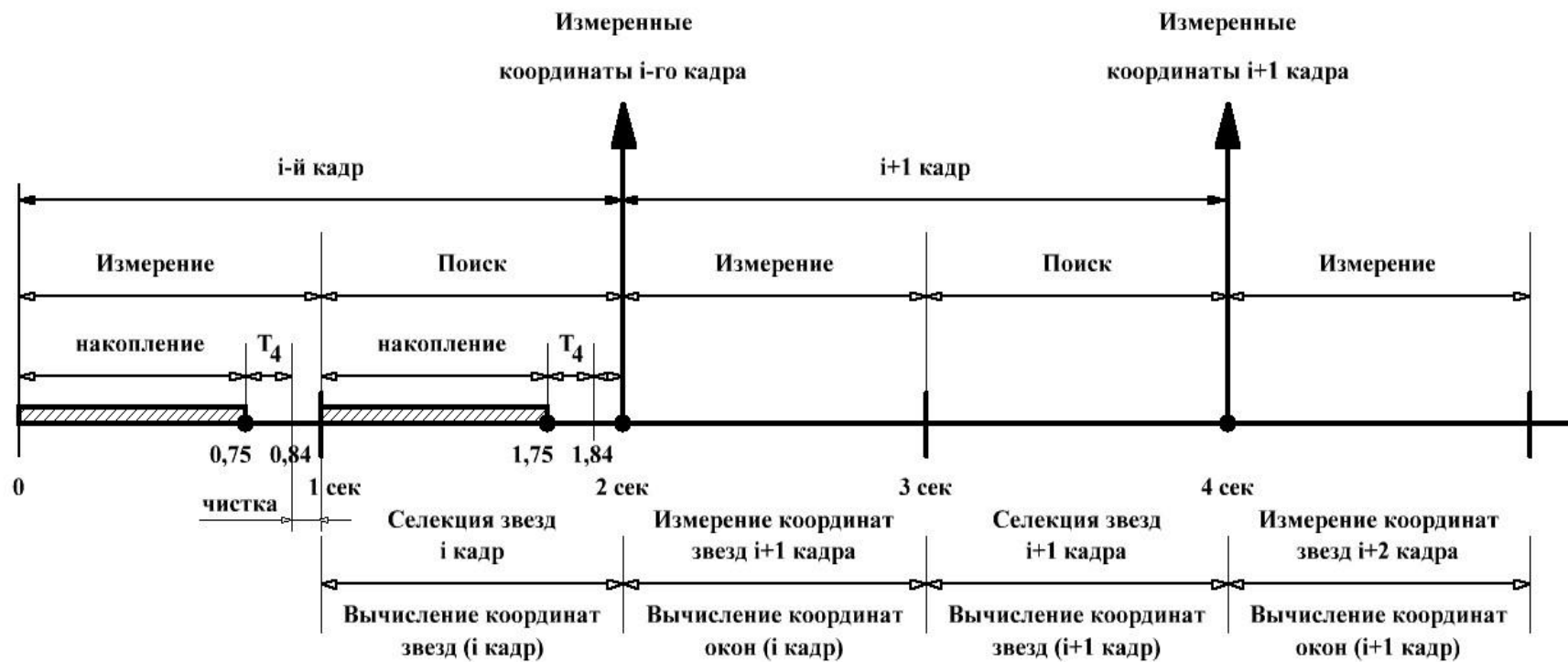


Рисунок 4.10. Циклограмма работы аналога АД

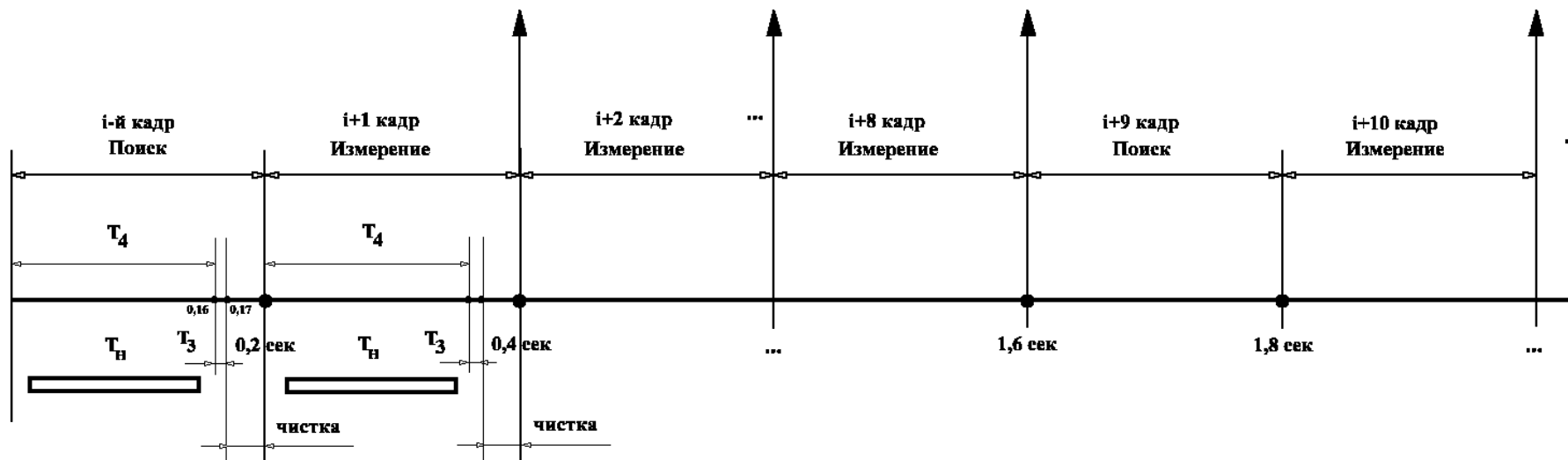


Рисунок 4.11. Циклограмма разрабатываемого АД

4.7 Оценка объемно-массовых характеристик фоточувствительного тракта АД

Предварительная оценка массы модулей фоточувствительного тракта АД приведена в табл. 4.12.

Таблица 4.12.

Модуль	Узел	Масса узла, г.	Масса модуля, кг.
ФППЗ	Устройство крепления и юстировки ФППЗ (CCD 4720)	200	0,319
	ФППЗ с элементом Пельтье	118,9	
Электроники	Плата устройства питания (УП1)	135	0,585
	Плата устройства питания (УП2)	80	
	Устройство формирования каналов (УФК)	50	
	Устройство обработки сигналов (УОС)	55	
	Устройство коммутационное (УК)	135	
	Устройство управления ФППЗ (УУФ)	75	
	Устройство аналоговое (УА)	55	
Основание АД		800	0,8
Итого:			1,704

Итак, приведенная оценка массы удовлетворяет требованию ТЗ.

Узлы разрабатываемого АД представлены на рис. 4.12.

Данная оценка массы является приближенной и может быть уточнена по результатам дальнейших работ.

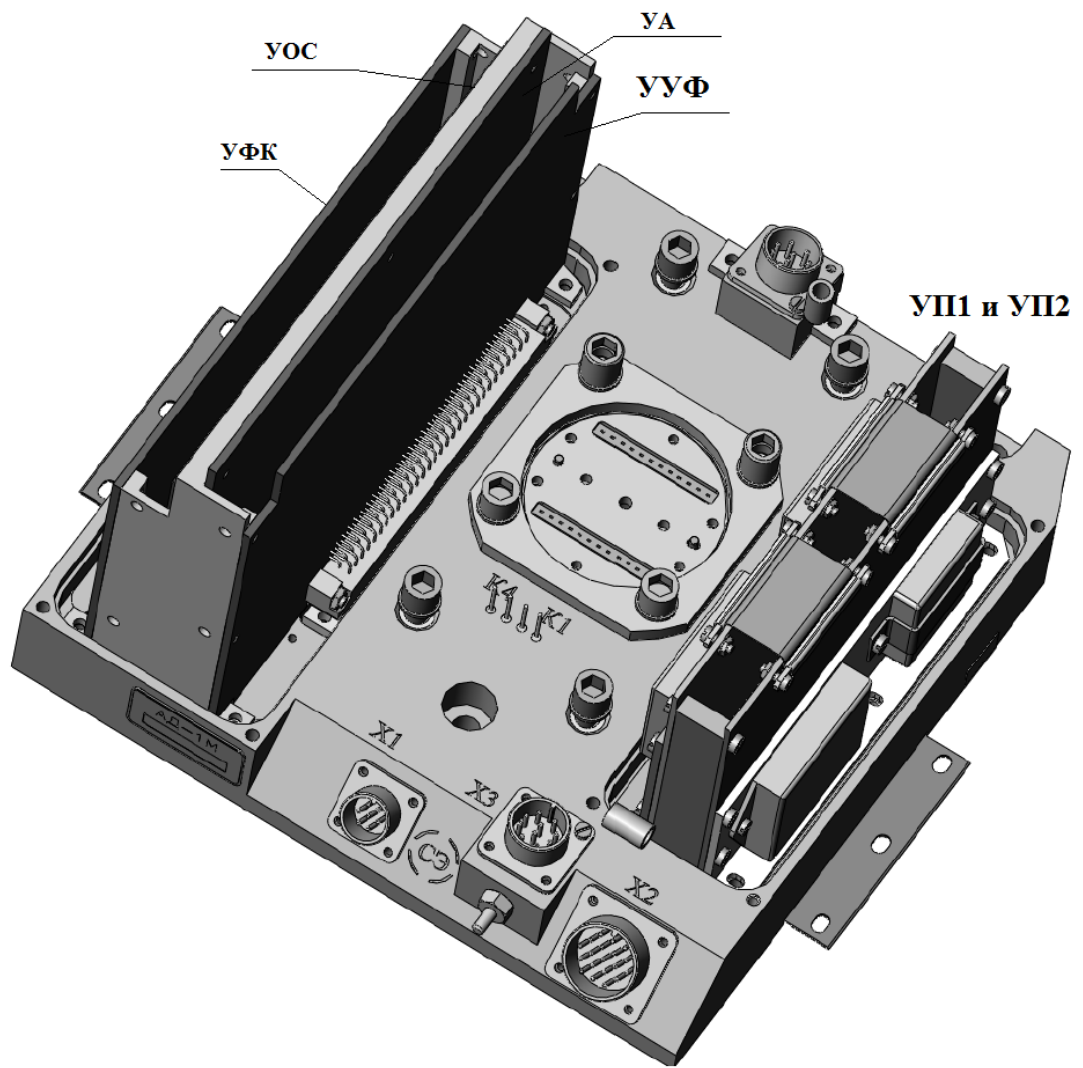


Рис. 4.12. Узлы разрабатываемого АД

5 Отладочно-моделирующий стенд (ОМС)

5.1 Назначение

Отладочно-моделирующий стенд предназначен для:

- отработки технических решений построения АД;
- отработки базовых алгоритмов работы АД;
- отработки схемотехнических решений основных узлов АД;
- отработки взаимодействия АД с БЦВС;
- оценки основных характеристик АД.

5.2 Состав, функциональная схема стенда

В состав отладочно-моделирующего стенда входят следующие основные устройства:

- имитатор изображений точки и фона СТФ1;
- ФППЗ (макет);
- Блок управления ФППЗ - БУФ (макет);
- Блок обработки сигналов - БОС (макет);
- Блок питания - БП (макет);
- трехступенная подвижная станция с модулем основания для отвода тепла ТЭБ и крепления макетов ФППЗ, БУФ, БОС и БП;
- ЭВМ IBM PC, имитирующая БВО СИП.

На последующих этапах планируется ввести объектив и имитатор ИТФ1-М.

Назначение составных устройств стенда

Макеты ФППЗ, БУФ, БОС, БП и схема соединений представляют собой в целом макет фотоэлектронного тракта ФППЗ (ФЭТ АД).

Имитатор СТФ1 обеспечивает:

- - проецирование на фоточувствительную область ФППЗ точечного изображения с возможностью его перемещения;
- проецирование на фоточувствительную область ФППЗ 5-ти точечных неподвижных изображений;
- одновременно с проецированием изображений засветку фоточувствительной плоскости ФППЗ равномерным фоном.

Узел крепления ФППЗ обеспечивает возможность установки ФППЗ, отвод тепла ТЭБ и установку БУФ, БОС и БП.

Трехступенная подвижная станция обеспечивает соосность положения ФППЗ и СТФ1, а также установку ФППЗ в фокальную плоскость имитатора. При помощи подвижек можно перемещать ФППЗ относительно СТФ1 с помощью микрометрического винта.

БУФ обеспечивает регулировку управляющих напряжений, а также управление и аналоговую обработку сигнала с ФППЗ.

БОС обеспечивает прием команд из IBM PC по интерфейсу RS-232, управление БУФ, обработку сигнала, поступающего из БУФ, и выдачу информации в IBM PC по интерфейсу RS-232.

БП формирует необходимые питающие напряжения для запитки ТЭБ ФППЗ, БУФ и БОС, а также питающих напряжений для светодиодов, расположение которых в объективе предполагается на последующих этапах работы.

IBM PC служит для выдачи управляющих команд в БОС по интерфейсу RS-232, приема информации из БОС по интерфейсу RS-232, имитируя БВО СИП, отображения информации на мониторе и документирования полученной информации на принтере.

Функциональная схема ОМС приведена на рис. 5.1.

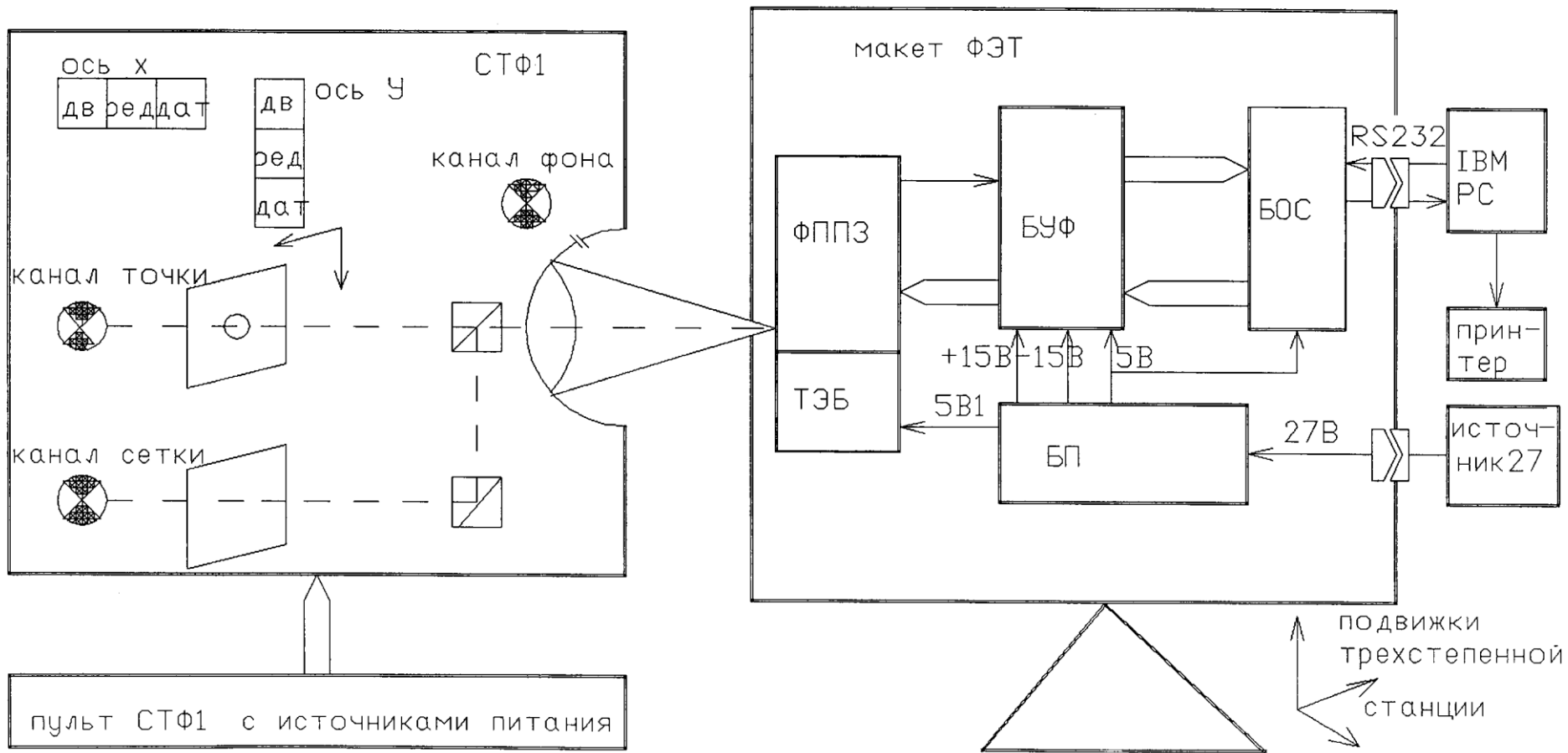


Рис. 5.1 — Функциональная схема ОМС

5.3 Описание конструкции

Имитатор СТФ1 и макет фотоэлектронного тракта ФППЗ, закрепленный на трехступенной подвижной станции, устанавливаются на оптическую скамью.

ФППЗ устанавливается на торцевой поверхности переходной детали, одновременно служащей для отвода тепла с термоэлектрической батареи (ТЭБ) ФППЗ. Для обеспечения простой смены ФППЗ используется специальное контактирующее устройство.

Блок БУФ конструктивно выполнен из двух плат так, чтобы было удобно менять ФППЗ. При помощи переменных резисторов, расположенных на боковых сторонах плат БУФ, можно легко выставлять паспортные режимы управления ФППЗ.

Блок БОС выполнен на одной плате и крепится на обратной стороне переходной детали, что обеспечивает минимальную длину связей с БУФ. Над блоком БОС расположен блок питания.

Конструкция крепления макетов БОС и блока питания выполнена по принципу "листов книги" и обеспечивает доступ для любой части платы БОС и блока питания, необходимый для проведения отладочных работ.

Конструкция макета предусматривает размещение разъемов для соединения с шиной питания 27В., IBM PC, а также для установки объектива на последующих этапах работы.

Конструктивная компоновка ОМС приведена на рис. 5.2.

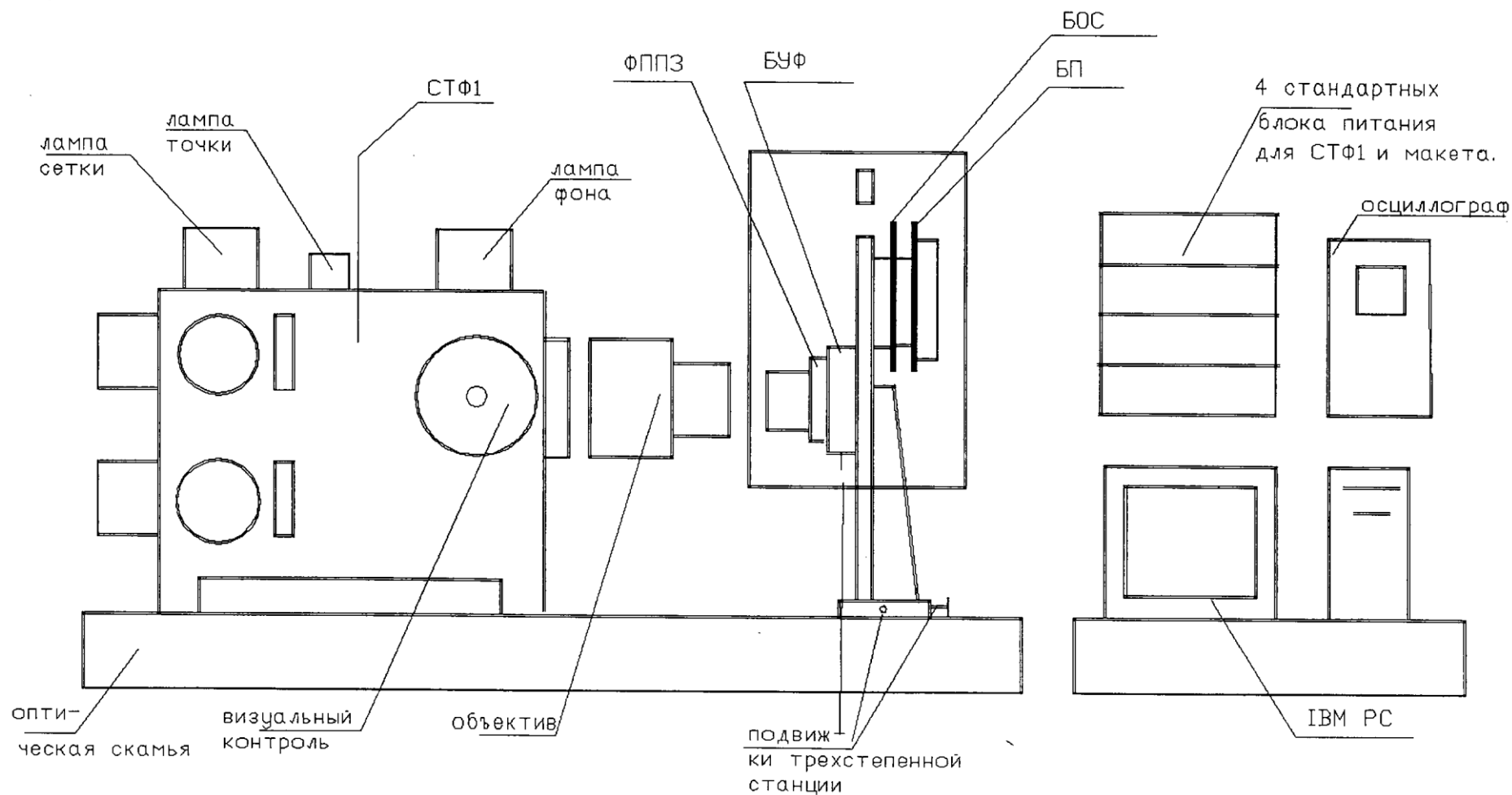


Рис. 5.2 — Конструктивная компоновка ОМС

6 Безопасность и экологичность проекта

6.1 Обеспечение электробезопасности отладочно-модулирующего стенда

6.1.1 Краткие характеристики работ в помещении

Отладочно-модулирующий стенд представляет собой темную комнату, в которой находятся:

- имитатор звезд;
- ФПУ (макет);
- БУФ (макет);
- БОС (макет);
- БП (макет);
- трехступенная подвижная станция с модулем основания для отвода тепла ТЭБ и крепления макетов ФПУ, БУФ, БОС и БП;
- ЭВМ ПК, имитирующая БВО СИП.

Имитатор звезд, макеты ФПУ, БУФ, БОС, БП и схема соединений представляют собой в целом макет фотоэлектронного тракта АД.

На имитатор звёзд подается малое напряжение с номиналом 12В, на макеты - 27 В.

Имитатор звезд обеспечивает:

- проецирование на фоточувствительную область ФППЗ точечного изображения с возможностью его перемещения;
 - проецирование на фоточувствительную область ФПУ 15-ти точечных неподвижных изображений;
 - одновременно с проецированием изображений засветку фоточувствительной плоскости ФПУ равномерным фоном.

Трехступенная подвижная станция обеспечивает соосность положения ФПУ и имитатора звезд, а также установку ФПУ в фокальную плоскость имитатора. При помощи подвижек можно перемещать ФПУ относительно имитатора звезд с помощью микрометрического винта.

БУФ обеспечивает регулировку управляющих напряжений, а также управление и аналоговую обработку сигнала с ФПУ.

БОС обеспечивает прием команд из ПК по интерфейсу RS-232, управление БУФ, обработку сигнала, поступающего из БУФ, и выдачу информации в ПК по интерфейсу RS-232.

БП формирует необходимые питающие напряжения для запитки ТЭБ ФПУ, БУФ и БОС, а также питающих напряжений для светодиодов, расположение которых в объективе предполагается на последующих этапах работы.

Имитатор звезд и макет фотоэлектронного тракта ФПУ, закрепленный на трехступенной подвижной станции, устанавливаются на оптическую скамью.

ФПУ устанавливается на торцевой поверхности переходной детали, одновременно служащей для отвода тепла с ТЭБ ФПУ. Для обеспечения простой смены ФПУ используется специальное контактирующее устройство.

ПК служит для выдачи управляющих команд в БОС по интерфейсу RS-232, приема информации из БОС по интерфейсу RS-232, имитируя БВО СИП, отображения информации на мониторе и документирования полученной информации на принтере.

Отладочно-модулирующий стенд (фото см Приложение 2) используется на начальном этапе проектирования АД для определения возможности отклика фотоэлектронного тракта АД, подбора элементной базы, разработки

алгоритмов программной селекции шумов от звёзд и, в целом, обработки фоточувствительного тракта.

6.1.2 Оценка категории помещения по опасности поражения электрическим током

Применение тех или иных мер защиты определяется характеристикой помещения, где расположены электроустановки. По степени опасности поражения током помещения подразделяются на три категории:

1. С повышенной опасностью (для помещений характерно одного из следующих условий: сырость, т.е. относительная влажность воздуха длительно превышает 75%; токопроводящая пыль; токопроводящие полы — металлические, земляные, железобетонные, кирпичные; высокая температура (выше 35°C); возможность одновременного прикосновения человека к металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам, имеющим соединение с землей, и металлическим деталям, корпусам электрооборудования, которые могут оказаться под напряжением. При повреждении изоляции, с другой.

2. Особоопасные (характеризуются наличием одного из следующих условий: особая сырость, т.е. относительная влажность воздуха близка к 100%; химически активная среда или среда, разрушающая изоляцию и токоведущие части; одновременно два или более условий повышенной опасности).

Территории размещения наружных электроустановок (на открытом воздухе, под навесом, за сетчатыми ограждениями) приравниваются к особо опасным помещениям.

3. Без повышенной опасности (в помещении отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность).

Наше лабораторное помещение относится к первой категории: *помещение с повышенной опасностью*, так как там железобетонные полы.

В помещениях с повышенной опасностью, прежде всего, снижается

сопротивление цепи человека. При высокой температуре, вследствие увеличения потоотделения, при увеличении влажности снижается сопротивление тела человека и его обуви. Уменьшается и практически становится равным нулю сопротивление основания, на котором находится человек (токопроводящие полы). Появляется возможность протекания тока через человека в случае прикосновения к нетоковедущим частям при аварийном режиме электроустановки и др.

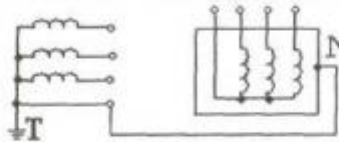
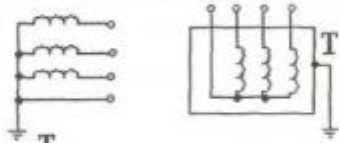

6.1.3 Система электроснабжения

Преддипломная практика и преддипломное проектирование выполняются на предприятии ФГУП МОКБ «Марс».

Лабораторное помещение находится в корпусе, построенном в 1998 году и с тех пор не реконструируемом. Электрическая сеть лабораторного помещения выполнена по системе TN-C.

Таблица 6.1

Обозначение систем заземления и применяемые защитные меры

Система заземления	Первая буква — режим нейтрали Т — заземленная I — изолированная	Вторая буква: N — ОПЧ занулены T — ОПЧ заземлены	Защитные меры
TN (нейтраль заземлена, ОПЧ занулены)		$T + N = TN$	Зануление, устройство защитного отключения
TT (нейтраль заземлена, ОПЧ заземлены)		$T + T = TT$	Устройство защитного отключения
IT (нейтраль изолирована, ОПЧ заземлены)		$I + T = IT$	Контроль изоляции, защитное заземление, устройство защитного отключения

Для обозначения сетей с глухозаземленной нейтралью вводятся следующие буквы, обозначающие функции нулевых проводников:

S – используются отдельно нулевой рабочий (N) и нулевой защитный (PE) проводники;

C – используется общий (совмещенный) нулевой проводник (PEN), выполняющий функции защитного (PE) и рабочего (N);

C-S – совмещенный нулевой проводник (PEN) в части сети разветвляется на рабочий (N) и защитный (PE).

Схема нашей электрической сети представлена на рис. 6.1.

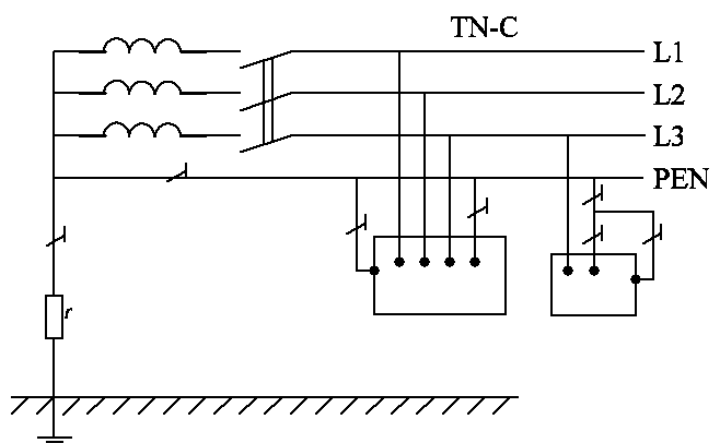


Рис. 6.1. – Сеть с глухозаземленной нейтралью и нулевым проводником (PEN), выполняющим функции рабочего и защитного проводников – система TN-C.

Для электроустановок до 1 кВ приняты следующие обозначения:

— система TN-C — система TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий.

Среди трехфазных электрических сетей с напряжением до 1000 В наибольшее распространение в стране получили сети с системой заземления TN-C. Такие сети относительно дешевы, поскольку в отличие от систем TNS и TN-C-S, их выполняют четырехпроводными.


6.1.4 Определение класса используемых приборов по способу защиты от поражения электрическим током


Классы защиты приборов описаны ГОСТ Р МЭК 61140-2000 [19].

Разделение на классы защиты отражает не уровень безопасности оборудования, а указывает на то, каким способом осуществляется защита от поражения электрическим током.

Рассмотрим деление на классы приборов подробнее и установим, к какому из них относятся приборы, используемые в отладочно-модулирующем стенде.

Электроприборы класса 0 - это оборудование, в котором защита от поражения электрическим током обеспечивается основной изоляцией, при этом отсутствует электрическое соединение открытых проводящих частей, если таковые имеются, с защитным проводником стационарной проводки. При пробое основной изоляции защита должна обеспечиваться окружающей средой (воздух, изоляция пола и т. д.).


 Электроприборы класса I - это оборудование, в котором защита от поражения электрическим током обеспечивается основной изоляцией и соединением открытых проводящих частей, доступных прикосновению, с защитным проводником стационарной проводки. В этом случае открытые проводящие части, доступные прикосновению, не могут оказаться под напряжением при повреждении изоляции после срабатывания соответствующей защиты. У оборудования, предназначенного для использования с гибким кабелем, к этим средствам относится защитный проводник (зелёно-жёлтый), являющийся частью гибкого кабеля.

 Электроприборы класса II - это оборудование, в котором защита от поражения электрическим током обеспечивается применением двойной или усиленной изоляции, В приборах класса II отсутствуют средства защитного заземления и защитные свойства окружающей среды не используются в

качестве меры обеспечения безопасности.

В некоторых специальных случаях (например, для входных клемм электронного оборудования) в оборудовании класса II может быть предусмотрено защитное сопротивление, если оно необходимо и его применение не приводит к снижению уровня безопасности. Оборудование класса II может быть снабжено средствами для обеспечения постоянного контроля целостности защитных цепей при условии, что эти средства составляют неотъемлемую часть оборудования и изолированы от доступных поверхностей в соответствии с требованиями, предъявляемыми к оборудованию класса II.

В некоторых случаях необходимо различать оборудование класса II "полностью изолированное" и оборудование "с металлической оболочкой". Оборудование класса II с металлической оболочкой может быть снабжено средствами для соединения оболочки с проводником уравнивания потенциала (зелёно-жёлтый), только если это требование предусмотрено стандартом на соответствующее оборудование. Оборудование класса II в функциональных целях допускается снабжать устройством заземления, отличающимся от устройства заземления, применяемого в защитных целях, при условии, что это требование предусмотрено стандартом на соответствующее оборудование.

 Электроприборы класса III - это оборудование, в котором защита от поражения электрическим током основана на питании от источника безопасного сверхнизкого напряжения и в котором не возникают напряжения выше безопасного сверхнизкого напряжения. В оборудовании класса III не должно быть заземляющего зажима.

Оборудование класса III с металлической оболочкой допускается снабжать средствами для соединения оболочки с проводником уравнивания потенциала при условии, что это требование предусмотрено стандартом на соответствующее оборудование. Оборудование класса III допускается

снабжать устройством заземления в функциональных целях, отличающимся от устройства заземления, применяемого в защитных целях, при условии, что это требование предусмотрено стандартом на соответствующее оборудование.

Таким образом, в отладочно-модулирующем стенде приборы распределяются по классам соответственно:

0 класс — имитатор звёзд и трехступенная подвижная станция с модулем основания для отвода тепла ТЭБ и крепления макетов ФПУ, БУФ, БОС и БП;

I класс - ПК, БП;

III класс — макеты ФПУ, БОС, БУФ.

6.1.5 Защитное зануление. Расчет тока КЗ. Выбор автоматического выключателя

Основной мерой защиты от поражения электрическим током в сетях с глухозаземленной нейтралью и системами заземления TN-C, TN-C-S и TN-S напряжением до 1000 В является зануление.

Защитным занулением [20] называется преднамеренное соединение открытых проводящих частей (например, нетоковедущих металлических частей электроустановок, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на них фазы) с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора. Это соединение осуществляется с помощью нулевого защитного проводника.

Принцип действия защитного зануления — превращение замыкания на открытые проводящие части (корпус) в однофазное короткое замыкание (т.е. замыкание между фазным и нулевым защитным проводниками) с целью вызвать большой ток, способный обеспечить срабатывание защиты и тем самым автоматически отключить поврежденную электроустановку от питающей сети. Такой защитой являются: плавкие предохранители или автоматические выключатели.

Кроме того, в аварийный период, т.е. с момента возникновения

замыкания на корпус и до автоматического отключения поврежденной электроустановки от сети, напряжение открытых проводящих частей (корпусов) относительно земли снижается. Это происходит за счет перераспределения фазного напряжения между сопротивлениями фазного и нулевого защитного проводников, а при наличии повторного заземления и за счет его защитных свойств.

Таким образом, зануление осуществляет два защитных действия: быстрое автоматическое отключение поврежденного электрооборудования от питающей сети и снижение напряжения зануленных открытых проводящих частей, оказавшихся под напряжением, относительно земли.

Время срабатывания защиты, регламентируемое в главе 1.7 ПУЭ 7 [20], указано в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Наибольшие допустимые времена защитного автоматического отключения для систем TN.

Номинальное фазное напряжение U_{ϕ} , В	Время отключения, сек
127	0,8
220	0,4
380	0,2
Более 380	0,1

На предприятии ФГУП МОКБ «Марс» электробезопасность осуществляется с помощью защитного зануления.

Принцип расчета тока короткого замыкания приведен ниже.

6.2 Обеспечение оптимальных условий труда в помещении

6.2.1 Эргономические требования

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 за оптимальное размещение приборов и инструментов на рабочем месте можно принять следующие величины: высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает инженер, должна составлять 720 мм. Желательно, чтобы рабочий стол инженера при необходимости можно было регулировать по высоте в пределах 680 – 780 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600x1000 мм². Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм. Рабочее место пользователя ПЭВМ следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20°. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

Конструкция рабочего стула должна обеспечивать:

- ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм;
- поверхность сиденья с закругленным передним краем;
- регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400 - 550 мм и углам наклона вперед до 15 град, и назад до 5 град.;
- высоту опорной поверхности спинки 300 +/-20 мм, ширину - не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости - 400 мм;
- угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах +/-30 градусов;
- регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260

- 400 мм;

- стационарные или съемные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной - 50 - 70 мм;

- регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах 230 +/-30 мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350 -500 мм.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 - 300 мм от края, обращенного к пользователю или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

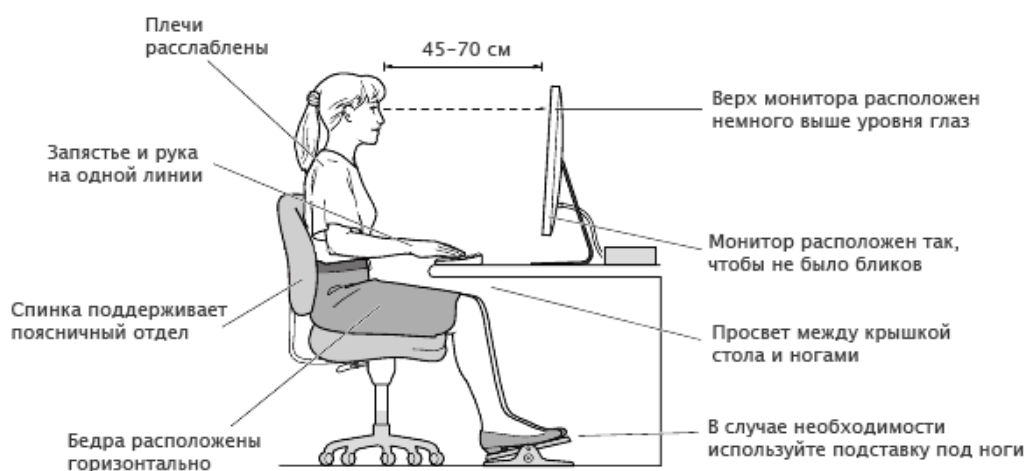


Рис. 6.2. Оптимальное размещение инженера и приборов на рабочем месте

6.2.2 Требования к освещению и его расчет

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300 лк, а комбинированная – 750лк; аналогичные требования при выполнении работ средней точности – 200 и 300 лк соответственно. (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [14]).

Расчет освещения производится для комнаты площадью 90 м^2 , ширина которой 6 м , высота – $3,5 \text{ м}$. Воспользуемся методом коэффициента использования [15].

Для определения количества светильников определим световой поток, падающий на поверхность по формуле:

$$F = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{\eta}, \text{ где}$$

F – рассчитываемый световой поток, Лм;

E – нормированная минимальная освещенность, Лк (определяется по таблице). Работу инженеров-конструкторов можно отнести к разряду точных работ, следовательно, минимальная освещенность будет $E=300 \text{ Лк}$;

S – площадь освещаемого помещения (в нашем случае $S=90 \text{ м}^2$);

Z – отношение средней освещенности к минимальной (обычно принимается равным $1,1 \dots 1,2$, пусть $Z=1,1$);

K – коэффициент запаса, учитывающий уменьшение светового потока лампы в результате загрязнения светильников в процессе эксплуатации (его значение зависит от типа помещения и характера проводимых в нем работ и в нашем случае $K=1,4$);

– коэффициент использования, (выражается отношением светового потока, падающего на расчетную поверхность, к суммарному потоку всех ламп и исчисляется в долях единицы; зависит от характеристик светильника, размеров помещения, окраски стен и потолка, характеризуемых коэффициентами отражения от стен (ρ_c), потолка (ρ_{Π}) и пола (ρ_p)). Значение η определим по таблице коэффициентов использования различных светильников. Для этого вычислим индекс помещения по формуле:

$$I = \frac{S}{h \cdot (A+B)}, \text{ где}$$

S – площадь помещения, $S=90 \text{ м}^2$;

h – расчетная высота подвеса, $h=3,5$ м;

A – ширина помещения, $A=6$ м;

B – длина помещения, $B=15$ м.

$$I = \frac{90}{3,5 \cdot (6+15)} = 1,2$$

Таблица 6.3

Коэффициенты отражения

Цвет поверхности	Коэффициент отражения, %
Поверхность белого цвета	70÷80
Светлая поверхность	50
Поверхность серого цвета	30
Поверхность темно-серого цвета	20
Темная поверхность	10

Из табл. 6.3 видно, что коэффициенты отражения равны $\rho_c=70\%$, $\rho_{\text{П}}=50\%$, $\rho_p=10\%$, и, зная индекс помещения I , по табл. 6.4 находим $\eta=0,54$.

Таблица 6.4

Коэффициент использования

ARS 418,436		
		Коэффициенты отражения, %
Потолок		80 80 80 70 50 50 30 0
Стены		80 50 30 50 50 30 30 0
пол		30 30 10 20 10 10 10 0
Индекс помещения	0,6	Коэффициент использования, %
		53 38 32 37 35 31 31 27
	0,8	60 45 38 44 41 38 37 34
	1	65 51 43 49 46 43 42 38
	1,25	70 57 49 54 51 48 47 44

Подставим все значения в формулу для определения светового потока

F :

$$F = \frac{300 \cdot 1,4 \cdot 90 \cdot 1,1}{0,54} = 76860 \text{ лм.}$$

Для освещения выбираем люминесцентные лампы типа OSRAM FQ 80 W/840 HO CONSTANT ($F=3400$ Лк), световой поток светильника $F=6800$ Лк, т.к. каждый светильник комплектуется двумя лампами.

Рассчитаем необходимое количество ламп по формуле:

$$N = \frac{F}{F_{\text{св}}}$$

N – определяемое число ламп;

F – световой поток, $F=76860$ Лм;

$F_{\text{л}}$ – световой поток лампы, $F_{\text{л}}=6800$ Лм.

Подставим значения:

$$N = \frac{76860}{6800} = 11.$$

Получаем, что в помещении 11 ламп. Такое количество ламп обеспечивают необходимые нормы освещенности.

6.2.3 Требования к микроклимату и воздуху рабочей зоны

Таблица 6.5

Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПиН 2.2.4.548-96) [16].

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Iа (до 139)	22-24	21-25	60-40	0,1
	Iб (140÷174)	21-23	20-24	60-40	0,1
	IIа (175÷232)	19-21	18-22	60-40	0,2
	IIб (233÷290)	17-19	16-20	60-40	0,2
	III (более 290)	16-18	15-19	60-40	0,3
Теплый	Iа (до 139)	23-25	22-26	60-40	0,1
	Iб (140÷174)	22-24	21-25	60-40	0,1
	IIа (175÷232)	20-22	19-23	60-40	0,2
	IIб (233÷290)	19-21	18-22	60-40	0,2
	III (более 290)	18-20	17-21	60-40	0,3

- Специальность инженер-конструктор относится к категории Ia, т.е. работы с интенсивностью энерготрат 120 ккал/ч (139 Вт).
- В производственных помещениях на рабочих местах должны обеспечиваться оптимальные величины показателей микроклимата:
 - температура воздуха 22÷25°C,
 - относительной влажность – 40÷60%,
 - скорость движения воздуха – не более 0,1 м/с,
 - температура поверхностей – 21÷26°C, в соответствии с гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений.
- Скорость подачи воздуха на одного человека составляет 20 м³/час.
- Перепады температуры воздуха по высоте и по горизонтали, а также изменения температуры воздуха в течение смены при обеспечении оптимальных величин микроклимата на рабочих местах не должны превышать 2°C и выходить за пределы нормативных величин для температуры воздуха.

6.2.4. Шум и вибрация

В табл. 6.6 указаны предельные уровни звука в зависимости от категории тяжести и напряженности труда, являющиеся безопасными в отношении сохранения здоровья и работоспособности.

Таблица 6.6

Предельные уровни звука, дБА, на рабочих местах (ГОСТ 12.1.003-83) [16]

Категория напряженности труда	Категория тяжести труда			
	I. Легкая	II. Средняя	III. Тяжелая	IV. Очень тяжелая
I. Мало напряженный	80	80	75	75
II. Умеренно напряженный	70	70	65	65
III. Напряженный	60	60	-	-
IV. Очень напряженный	50	50	-	-

Уровень шума на рабочем месте инженеров-конструкторов и

операторов видеоматериалов не должен превышать 50 дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах – 65 дБА. Уровень шума, возникающий от нескольких некогерентных источников, работающих одновременно, подсчитывается на основании принципа энергетического суммирования излучений отдельных источников:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \sum_{i=1}^{i=n} 10^{0,1L_i}, \text{ где}$$

L_i – уровень звукового давления i -го источника шума;

n – количество источников шума.

Уровни звукового давления источников шума, действующих на оператора на его рабочем месте представлены в табл. 6.7.

Таблица 6.7

Уровни звукового давления различных источников

Источник шума	Уровень шума, дБА
Жесткий диск	40
Вентилятор	45
Монитор	17
Клавиатура	10
Принтер	45
Сканер	42

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg (10^4 + 10^{4,5} + 10^{1,7} + 10^1 + 10^{4,5} + 10^{4,2}) = 49,5 \text{ дБ.}$$

Полученное значение не превышает допустимый уровень шума для рабочего места оператора, равный 65 дБА.

6.2.5. Техника пожарной безопасности

Таблица 6.8

Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности
(НБП 105-03)

В1-В4 пожароопасные	Горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б
------------------------	---

Категория помещения	Удельная пожарная нагрузка q на участке, МДж*м ⁻²	Способ размещения
В1	Более 2200	Не нормируется
В2	1401÷2200	См. п. 25
В3	181÷1400	То же
В4	1÷180	На любом участке пола помещения площадью 10 м ² . Способ размещения участков пожарной нагрузки определяется согласно п. 25

При пожарной нагрузке, включающей в себя различные сочетания (смесь) горючих, трудногорючих жидкостей, твердых горючих и трудногорючих веществ и материалов в пределах пожароопасного участка, пожарная нагрузка Q , МДж, определяется по формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^n G_i \cdot Q_{ni}^p,$$

где G_i – количество i -го материала пожарной нагрузки, кг;
 Q_{ni}^p – низшая теплота сгорания i -го материала пожарной нагрузки, МДж*кг⁻¹.

Удельная пожарная нагрузка g , МДж*м⁻², определяется из соотношения:

$$g = \frac{Q}{S}.$$

Для всех производственных и складских помещений должна быть определена категория взрывопожарной и пожарной опасности, а также класс зоны по правилам устройства электроустановок (далее – ПУЭ), которые надлежит обозначать на дверях помещений. Категория рабочего помещения В1, т.к. нет никаких легковоспламеняющихся материалов. Площадь помещения $S=6*15=90$ м². Класс пожара Е, т.к. есть электрооборудование (компьютеры, светильники). По таблице в ППБ 01-03 находим количество огнетушителей:

- 1) 2 порошковых огнетушителя вместимостью 5 л с массой огнетушащего вещества 4 кг;
- 2) 1 порошковый огнетушитель вместимостью 10 л с массой огнетушащего вещества 9 кг;
- 3) 2 углекислотных огнетушителя вместимостью 5 л с массой огнетушащего вещества 3 кг;
- 4) 2 углекислотных огнетушителя вместимостью 8 л с массой огнетушащего вещества 5 кг.

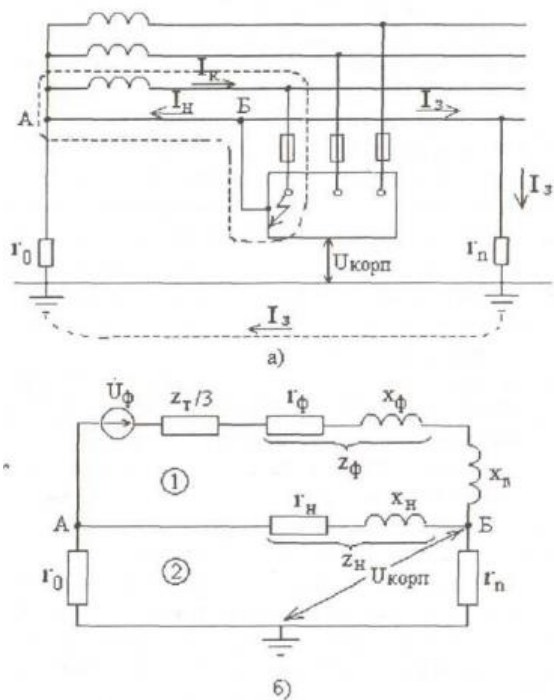


Рис. 6.3 – короткое замыкание фазы 1 на зануленный корпус электроустановки.

- а) принципиальная схема электрической сети с занулением;
- б) эквивалентная схема.

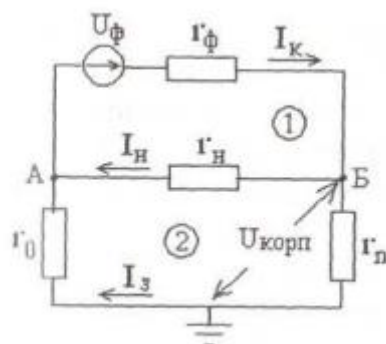


Рис. 6.4 – Упрощенная эквивалентная схема.

Как видно из рис. 6.4 напряжение на корпусе равно напряжению относительно земли т. Б, в которой корпус подключен к нулевому проводнику:

$$U_{кпр} = U_B = I_n \cdot r_n$$

Используя формулы:

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{r_0 + r_n},$$

$$U_{AB} = I_k \cdot r_n,$$

$$I_k = \frac{U_\phi}{\sqrt{2r_t^2 + (r_\phi + r_n)^2}},$$

полученных из рассмотрения контуров 1 и 2 эквивалентной схемы (рис. 6.4), при условии $I_3 \ll I_k$ и $I_n = I_k$ найдем:

$$U_{\phi} = U_\phi \frac{I_k}{I_k} = U_\phi \cdot \frac{I_k}{I_k}.$$

По документации на предприятии ФГУП МОКБ «Марс» используется автоматический выключатель фирмы Legrand: 003386 Автоматический выключатель DX-Стандарт. 1П 16А 6кА, тип "С" ($I_{нк} = 5 \div 10$), изображенный на рис. 6.5.



Рис. 6.5 – Автоматический выключатель DX-Стандарт. 1П 16А 6кА, тип "С".

Автоматический выключатель (МВБ) ДХ-Стандарт, однополюсный.
Тип С (для защиты линий группового освещения и нагрузок с большими пусковыми токами (бытовая техника) в жилых и производственных помещениях). Номинальный ток - 16А. Отключающая способность 6кА. 1 модуль DIN (17,5 мм).

7 Технико-экономическое обоснование проекта

7.1 Определение актуальности и необходимости

Астродатчик (АД) — это бортовой прибор летательного аппарата, фиксирующий направление на какую-либо звезду.

АД создаются с целью периодической астрокоррекции гироскопов, по непрерывным показаниям которых осуществляется управление ориентацией КА.

Задачи решаемые АД:

- обеспечение возможности автономного поиска и обнаружения звезд;
- селекция звезд в поле зрения по совокупности признаков;
- слежение за звездами;
- измерение и вычисление координат энергетических центров;
- изображений с учетом паспортных параметров каждого АД;
- выдача координат нескольких звезд (до 15).

Астрокорректоры используются в сеансном режиме, от них не требуется высокая частота обновления информации и работа при высоких угловых скоростях КА.

За последние два десятилетия было разработано несколько десятков разновидностей приборов ориентации и навигации КА, отличающихся принципами построения, особенностями использования, конструктивными особенностями и т.д.

Рассмотрим основные характеристики современных приборов ориентации по звездам отечественного и зарубежного производства.

Таблица 7.1

Характеристики некоторых современных приборов ориентации по звездам

Прибор	Масса, кг	Потребляем ая мощность, Вт	Точность определения ориентации, σх,у/σх,	Максимальная угловая скорость, °/С	Частота обновления информации, Гц	Поле зрения, град	Число элементов матрицы	Ресурс, час
<i>АД-1М</i> <i>МОКБ «Марс»</i>	2,5	не более 13	1,1/3,0(*)	10	Не менее 5	12 x 12	ПЗС 512 x 512	Не менее 45 000
<i>БОКЗ-МЗ</i> <i>ИКИ РАН</i>	1,6	8	5/12	4	1 (4)	18 x 18	ПЗС 512 x 512	Не менее 20 000
<i>ASF 45\40</i> <i>ОАО «Пеленг»</i>	2,45	10	1,4/10 (ω=0,067°/С)	3	12	37,6	КМОП 2048 x 2048	80 000
<i>348К «НПП «Геофизика- Космос»</i>	3,7	11,5	11	1	5	15 x 15	КМОП 1024 x 1024	144 000
<i>SED26</i> <i>SODERN (Франция)</i>	3,3	Не более 12,5	1/5	20	10	25 x 25	ПЗС 1024 x 1024	Не ограничен в пределах САС
<i>HYDRA</i> <i>SODERN (Франция)</i>	4,2	12	3	10	30	23 x 23	КМОП 1024 x 1024	Не ограничен в пределах САС
<i>Altair-НВ Star Tracker</i> <i>SSTL (Великобритания)</i>	1,7	3	5/17	0,5	1	16 x 11	ПЗС	50 000
<i>ASTRO APS Jena- Ortronik (Германия)</i>	1,8	9	2/15	5	10	20 x 20	КМОП 1024 x 1024	> 18 лет

* - Точность определения параметров ориентации (σ) при совместной обработке информации двух АД-1М в установившемся режиме фильтрации

Каждый из приведенных астрокорректоров является конкурентноспособным прибором для разрабатываемого АД-1М.

Рассмотрим плюсы и минусы приборов.

Масса:

– один из крайне важных параметров, так как постоянно ведется борьба за уменьшение веса каждого прибора, отправляемого «в лёт», что обусловлено топливными и, как следствие, денежными затратами. Как видно из таблицы 7.1 прямыми конкурентами являются 2 прибора: Altair-НВ (Великобритания), ASTRO APS (Германия) и БОКЗ-МЗ (Россия);

Потребляемая мощность:

– прямым конкурентом является только Altair-НВ (Великобритания);

Максимальная угловая скорость:

– АД-1М конкурирует только с SED26 И HYDRA (Франция);

Поле зрения:

– определяет возможность визирования звезд, то есть чем больше поле зрения, тем больше звезд попадает в область визирования, тем легче ориентация космического аппарата. Здесь АД-1М проигрывает SED26 И HYDRA (Франция), Altair-НВ (Великобритания) и, БОКЗ-МЗ (Россия);

Чувствительность (основополагающий параметр):

– чувствительность КМОП-матриц несомненно лучше, здесь АД-1М проигрывает ASF 45\40 и 348К (Россия), HYDRA (Франция) и ASTRO APS (Германия);

Стоимость:

– если бы и была возможность закупить импортные приборы, то их закупка, транспортировка и таможенные взносы в сумме значительно бы превысили общие затраты на разработку прибора АД-1М.

Таким образом, из конкурентов остались только БОКЗ-МЗ и 348К. Но БОКЗ-МЗ интегрированный прибор, то есть в нём объединен датчик звездной

ориентации и датчики угловой скорости (ДУС), то есть принцип работы БОКЗ-МЗ не аналогичен АД-1М, следовательно, из сравнения выбывает. Остаётся 348К, изготавливаемый «Геофизика-Космос», но данный прибор проигрывает АД-1М по весу.

На основе приведенных выше выводов доказана актуальность и необходимость прибора АД-1М.

7.2 Расчет сметы затрат

Непосредственной разработкой фоточувствительного тракта занимаются ведущий инженер, инженер и руководитель проекта, а также необходима работа с инженером-конструктором. В таблице произведен расчет основной заработной платы.

Таблица 7.2

Расчёт основной заработной платы

Исполнители	t, мес.	Стоимость, руб/мес.	Сумма $C_{з/п}$, руб
Ведущий инженер	24	45000	$24 \times 45000 = 1080000$
Руководитель проекта	24	50000	$24 \times 50000 = 1200000$
Инженер-конструктор	24	35000	$24 \times 35000 = 840000$
Инженер	24	25000	$24 \times 25000 = 600000$
Инженер-конструктор	3	25000	$3 \times 25000 = 75000$
Главный технолог	3	30000	$3 \times 30000 = 90000$
Технолог	3	25000	$3 \times 25000 = 75000$
Монтажник	3	20000	$3 \times 20000 = 60000$
Итого:			$C_{з/п} = 4020000$ руб

Дополнительная заработная плата берётся в размере 20% от прямого фонда заработной платы.[22]

$$C_{\text{доп.ЗП}} = C_{\text{ЗП}} \cdot K_{\text{доп}} = 4020000 \cdot 0,2 = 804000 \text{ руб.}$$

Просуммируем значения основной и дополнительной заработной платы, определим фонд оплаты труда:

$$C_{\text{фот}} = C_{\text{зп}} + C_{\text{доп.зп}} = 4824000 \text{ руб.}$$

Отчисление на социальное страхование в размере 30% от суммы оплаты труда в соответствии с Налоговым Кодексом РФ ч.2 гл.24

$$C_{\text{сс}} = C_{\text{фот}} \cdot K_{\text{сс}} = 4824000 \cdot 0,3 = 1452600 \text{ руб.}$$

Накладные расходы составляют 200% от основной заработной платы.

$$C_{\text{нр}} = C_{\text{зп}} \cdot K_{\text{нр}} = 4020000 \cdot 2 = 8040000 \text{ руб.}$$

Таблица 7.3

Смета затрат на разработку

Статья затрат	Значение, руб.	Уд. вес, %
1. Затраты на оплату труда непосредственных исполнителей, $C_{\text{зп}}$	4020000	28,079
2. Дополнительная заработная плата, $C_{\text{дзп}}$	804000	5,617
3. Отчисление на социальное страхование, $C_{\text{сс}}$	1452600	10,147
4. Накладные расходы	8040000	56,157
Итого:	14316600	100

7.3 Определение экономической эффективности

Оценку экономической эффективности проводим балльно-индексным методом.

Таблица 7.4

Экономическая эффективность разработки

Показатели	Индекс значимости	Разработка		Аналог	
		балл	взвеш. балл	балл	взвеш. балл
1. Технические					
Поле зрения	0,08	5	0,25	7	0,35
Разрешение	0,25	8	2	6	1,5
Чувствительность прибора	0,25	8	1,2	6	1,0
Шумы прибора	0,15	5	0,75	4	0,6
Сложность выполнения прибора	0,1	5	0,25	8	0,4
Питание	0,05	8	0,4	6	0,15
2. Экономические					
Цена	0,12	6	0,6	5	0,5
Итого	1		5,45		4,9

Оценка балльно-индексным методом показала, что разрабатываемый прибор по своим характеристикам превосходит уже имеющиеся аналоги.

Вывод: В данной главе была описана актуальность разработки, высчитана смета затрат на разработку проекта, которая составила 14316600 рублей, а также была рассчитана экономическая эффективность балльно-индексным методом. Всё выше изложенное подтверждает актуальность и необходимость данной разработки.

Заключение

В процессе работы над данным проектом был разработан фоточувствительный тракт звёздного прибора АД-1 на основе матрицы фотоприемника CCD 47-20 VI AIMO с использованием объектива «Лицей». Ниже приведена сравнительная таблица характеристик аналога и разрабатываемого АД. Попутно была дана справка по истории развития приборов астроориентации, проведён обзор известных моделей и фирм-производителей.

Параметры	АД-1	АД
1. Фотоприемник		
Тип приемника	Каскад-1М (снят с производства, имеется аналог «Лидер»)	ССД 47-20 (доступен, используется в SED26, Франция)
Производитель	Россия «ООО НПП Заряд-Т»	Англия, ф. E2V
Термоохладитель	Встроенный	Внешний
Перенос заряда	Строчный	Кадровый
Засветка	Прямая	Обратная
Формат, пиксель	512×512	1024×1024
Размер пикселя, мкм	23×23	13×13
Чувствительность	6 В/люкс•сек	25 В/люкс•сек ⁻¹
Темновой сигнал, мВ	4,0	0,4
Насыщение, В	1,5	0,45
Считывание, МГц	1,6	5,0
Радиостойкость, крад	>14 (по результатам испытаний)	>35
Спектральная хар-ка, нм	400-1100	200-1100
Динамический диапазон	~1000:1	~50000:1
Корпус	cerdip-24 (с окном, симметричен)	cerdip-32 (с окном, асимметричен)
2. Объектив		
Тип	Лицей	Лицей, с доработкой юбки с имитатором точки.
3. Характеристики фоточувствительного тракта		
Чувствительность	$m_a = -0,5 \dots 5$	$m_a = -0,5 \dots 6$
Быстродействие, Гц	0,5	5
Поле зрения, угл.град.	12×12	14×14
Число звезд в поле зрения	до 15	до 15
ОМХ, кг	2,0	1,7

Разработанный фоточувствительный тракт удовлетворяет требованиям ТЗ по чувствительности, быстродействию, числу одновременно визируемых звёзд и точности определения их координат, угловому полю зрения.

Конструктивно-технические требования к массово-габаритным характеристикам тракта, способу подключения и установки на посадочное место, а также отводу тепла, приведённым в ТЗ, удовлетворяют ГОСТ В20.39.301-85.

Требования к условиям изготовления фоточувствительного тракта соответствуют ГОСТ 19005-81, ОСТ 92-1615-74 и ГСТ 14644-1-2002, а также требованиям ТЗ.

Для решения поставленных задач при разработке старая матрица фоточувствительного тракта «Каскад-1» была заменена более продвинутым и перспективным аналогом 47-20 VI АІМО, что позволило обеспечить требования по быстродействию, энергопотреблению и объемно-массовым характеристикам.

В экономической части работы была обоснована актуальность данной разработки, приведена смета затрат и определена экономическая эффективность проекта.

Полученный результат соответствует требованиям установленного ТЗ, актуален и имеет перспективы к дальнейшей модификации. Недочёты, которые могут быть выявлены при дальнейшей разработке данной темы или возникнуть при эксплуатации, должны быть подробно рассмотрены с целью их устранения и последующего предотвращения подобных проблем.

Список литературы:

1. Авдеев С.П. Методика габаритного и энергетического расчета оптико-электронных приборов пассивного типа. – Л.: Ленингр. ин-т точной механики и оптики, 1978.
2. Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А. Основы теории анализа и синтеза воздушной телевизионной аппаратуры. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2000.
3. Гладыревский А.Г. Методы и алгоритмы ориентации космического аппарата с помощью астросистемы – Москва, 2002
4. Дмитриев А.П., Ветров О.В. Геофизике – 175 лет. – Москва: Типография Новости, 2012
5. Дятлов С.А., Бессонов Р.В. Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов – Всерос. научно-технич. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космич. аппаратов»: Сб. тр. Россия, Таруса, 22-25 сентября 2008. Москва: ИКИ РАН, 2008. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
6. Дятлов С.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Красиков В.А., Куделин М.И., Собчуг В.Г., Форш А.А. Особенности построения и функционирования приборов астроориентации БОКЗ со встроенными датчиками угловой скорости – Всерос. научно-технич. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космич. аппаратов»: Сб. тр. Россия, Таруса, 22-25 сентября 2008. Москва: ИКИ РАН, 2008. (Сер. «Механика, управление и информатика»).
7. Ивандиков Я.М. Оптико-электронные приборы для ориентации и навигации космических аппаратов. - Москва: Машиностроение, 1979.
8. Изнар А.Н., Павлов А.В., Федоров Б.Ф. Оптико-электронные приборы космических аппаратов. - М.: Машиностроение, 1972.

9. Куимов К.В., Амирханян В.Р., Соколова А.Ю. Определение положения астрономического объекта по наблюдениям с прибором зарядовой связи. – heritage.sai.msu.ru. – Москва: Изд. САО ГАИШ, 2002.
10. Лобанов В.С., Тарасенко Н.В. Зборошенко В.Н., Горячев А.Ф. Астроинерциальные системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. Состояние и перспективы развития – II научно-техническая конференция «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами»: Москва, ФГУП МОКБ «Марс», 24-26 октября 2012
11. Малинин В.В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами. – Новосибирск: изд-во «Наука», 2005
12. Материалы технического предложения «Астротелевизионный датчик с использованием в качестве фотоприемного устройства ФППЗ» - Москва, ФГУП МОКБ «Марс»
13. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов – Москва: Изд-во Логос, 2007.
14. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
<http://www.0-1.ru/law/showdoc.asp?dp=npb105-03>
15. http://www.ltcompany.com/UserFiles/LT_Table.pdf
16. СанПиН 2.2.4.548-96
<http://www.med-pravo.ru/PRICMZ/SanRules/1996/San2.2.4.548-96-3.htm>
17. ГОСТ 12.1.003-83
<http://vsegost.com/Catalog/80/803.shtml>
18. НБП 105-03
<http://www.0-1.ru/law/showdoc.asp?dp=npb105-03>
19. ППБ 01-03
http://theor.jinr.ru/guide/norm/ppb_01-03.pdf

20.ГОСТ Р МЭК 61140-2000

http://www.elec.ru/library/gosts_e07/gost_r_mek_61140-2000/

21.Монахов А.Ф. Защитное зануление – Москва: изд-во МЭИ, 2010

http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=1672

22.ПУЭ 7

<http://www.elec.ru/library/direction/pue.html>

23.Чучкалова Е.И. Техничко-экономические расчеты в выпускных квалификационных работах (дипломных проектах): Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос.проф.-пед. ун-т», 2006

24.http://www.nevael.ru/ccd47-20_bi_nimo. Описание матрицы фирмы e2V CCD 47-20 BI NIMO.

25.CCD47-20 NIMO Back Illuminated High Performance NIMO Back Illuminated CCD Sensor, e2V technologies, A1A-100040 Issue 2, March 2006.

26.www.e2v.com

27.STAR-1000 Datasheet

http://gwest.gats-inc.com/sofie/sun_sensor/star_1000_5.pdf

28.Новые направления развития матричных ФППЗ в ОАО «ЦНИИ “Электрон”»

<http://www.vimi.ru/applphys/2006/2006-4/06-4-15.pdf>

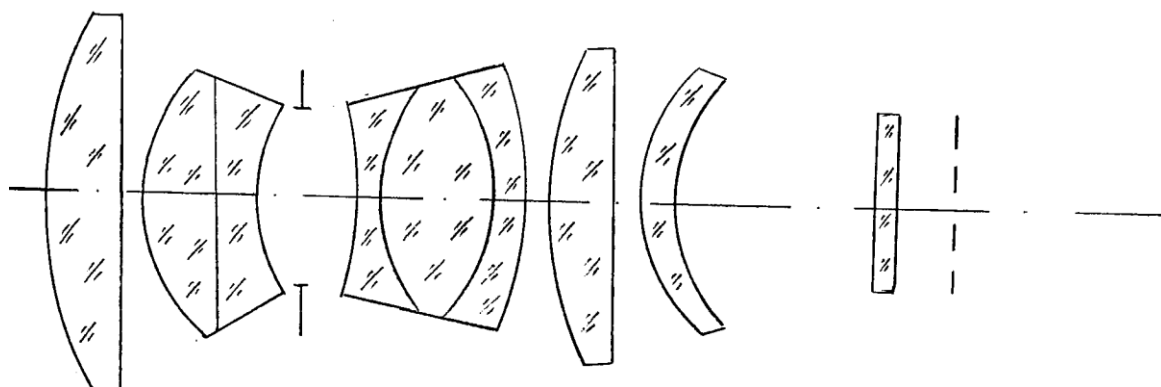
ПРИЛОЖЕНИЕ 1



Рис. 1. Астродатчик АД-1 фирмы МОКБ «МАРС»



Рис. 2. Объектив астродатчика АД-1



Марки стекол: ТК121, ТК123, ОФ
 Длина: 75,6 мм ($f=51,9$ мм)

Рис.3 Оптическая схема объектива «Лицей»



Рис. 4. Бленда астродатчика АД-1



Рис. 5. Шторка астродатчика АД-1

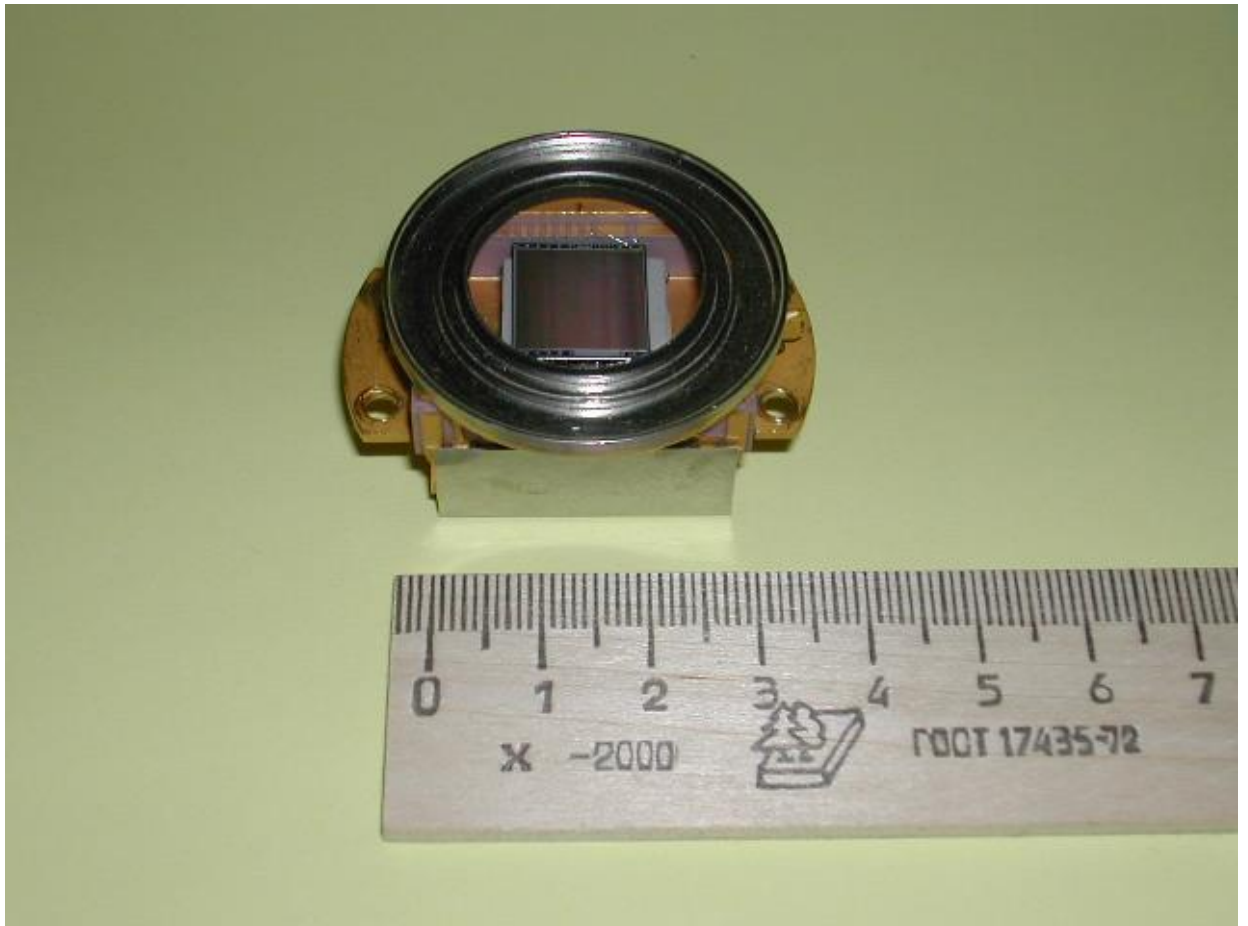
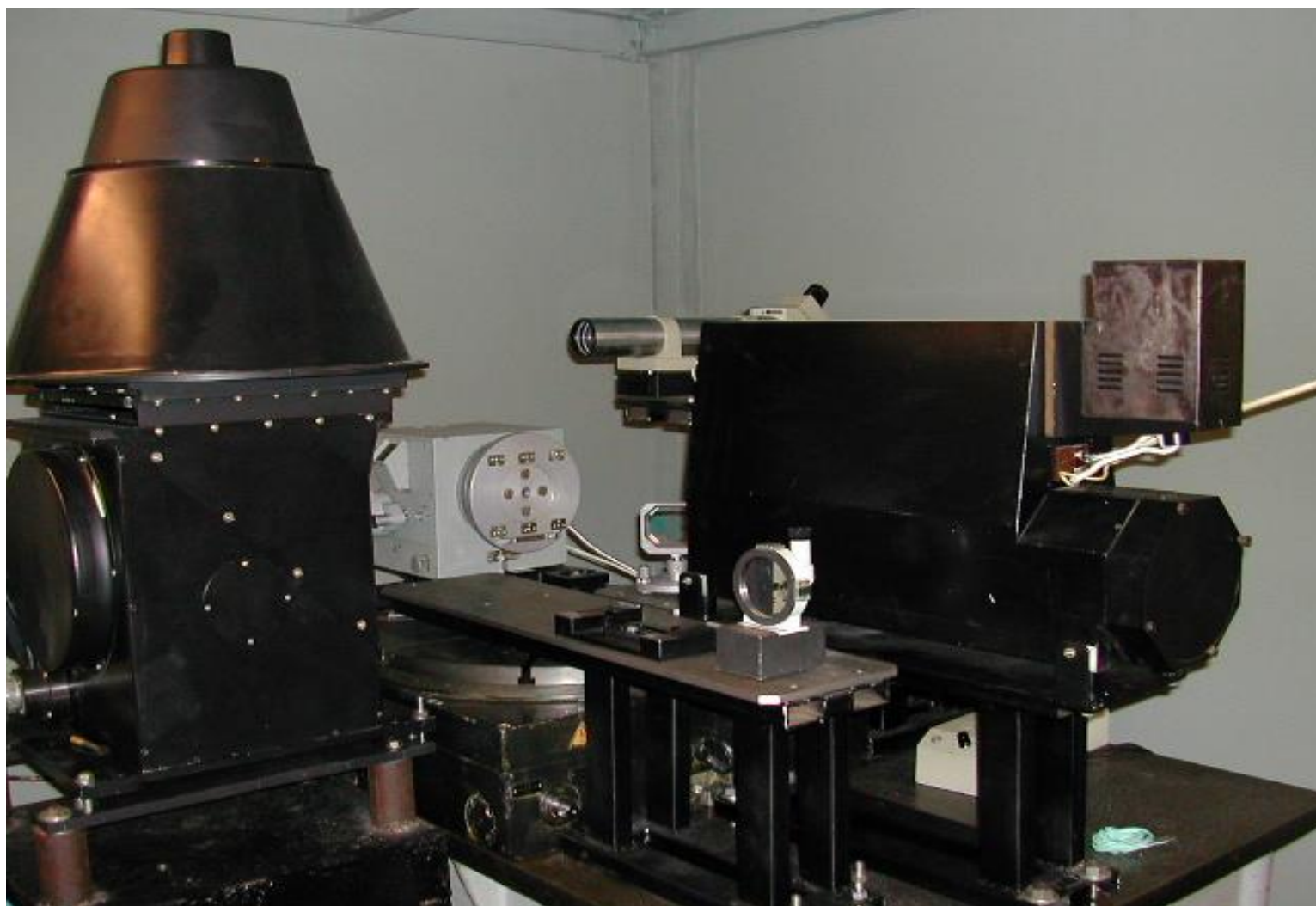


Рис. 6. ФППЗ астродатчика АД-1



Рис. 7. Электронный блок астродатчика АД-1 с объективом

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



Точностной стенд

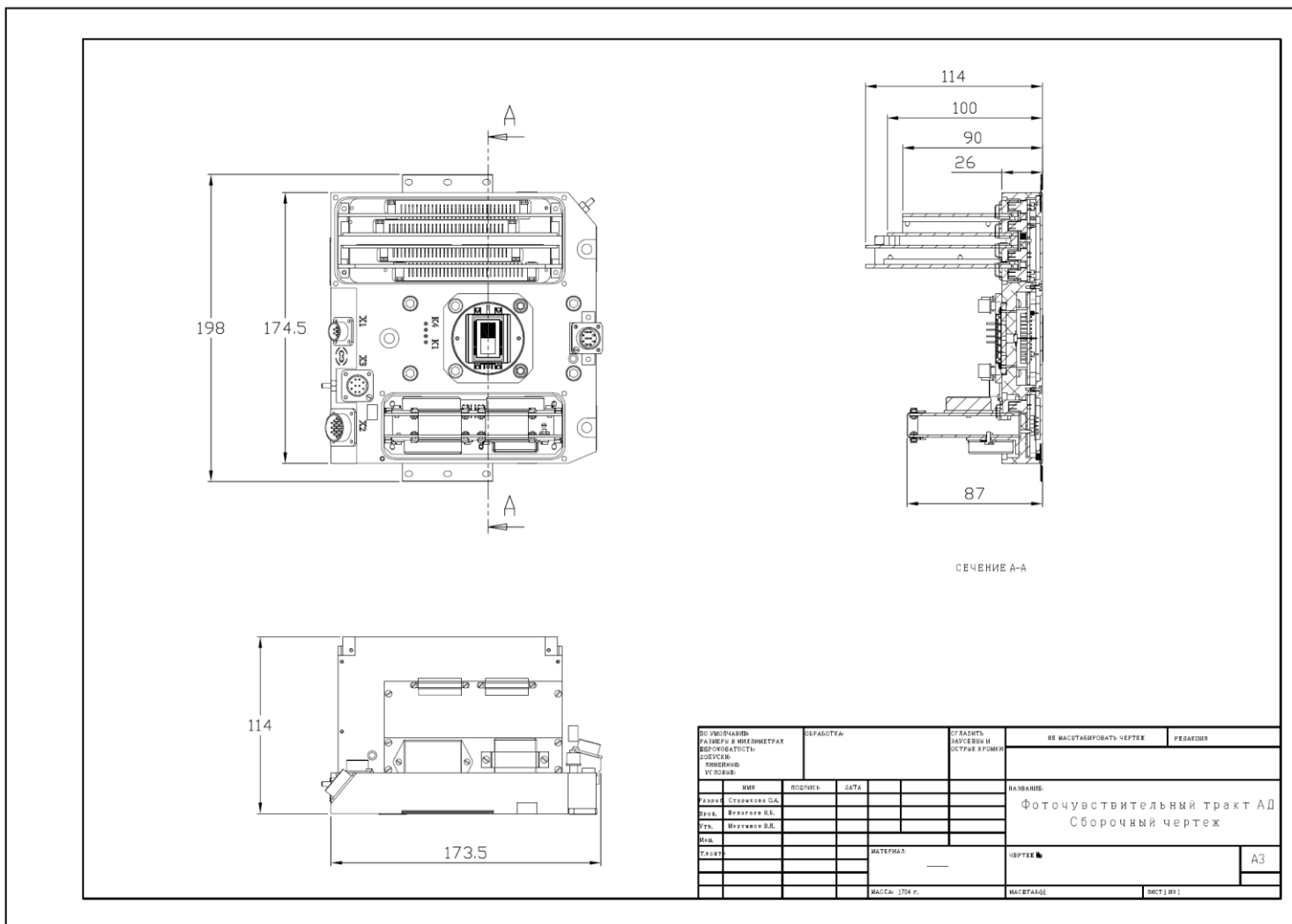


Стенд проверки матрицы астродатчика АД-1



Стенд проверки электроники астродатчика АД-1

ПРИЛОЖЕНИЕ 3



ПО УМЕРЧАВАНЮ РАЗМЕРИ В МИЛЛИМЕТРАХ ТОЧНОСТЪТЪ СЪГЛАСНО УТОВОДИ		ОБРАБОТКА		СГЛАСИТЬ НАСЧЕТЪ И ОСТРЫЕ КРОМКИ		НЕ МАСШТАБИРОВАТЬ ЧЕРТЕЖ РЕДАКТОР	
ИМЯ	ПОДПИСЬ	ДАТА			НАЗВАНИЕ		
Редир	Славянов С.А.				Фоточувствительный тракт АД Сборочный чертёж		
Директ	Михайлов И.В.						
Мех.	Михайлов И.В.						
Главн			МАТЕРИАЛ		ЧЕРТЕЖ №		А3
			МАСШ: 1:100 г.		МАСШТАБ		ЛИСТ 1/01