

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия
«_____» _____ 2018г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОБИЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ
ДИНАМИЧЕСКОГО СТЕНДА ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ОТРАБОТКИ ДАТЧИКОВ ЗВЁЗДНОЙ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА
Тема

27.04.03 «Системный анализ и управление»

код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	<u>подпись, дата</u>	профессор МБК ПФиКГ д-р техн. наук, профессор должность, ученая степень	Е.Н. Головенкин инициалы, фамилия
Выпускник	<u>подпись, дата</u>		<u>О.И.Марусов</u> инициалы, фамилия
Рецензент	<u>подпись, дата</u>	Инженер испытатель АО «ИСС» должность, ученая степень	<u>А.И. Пилигрим</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	<u>подпись, дата</u>		<u>Е.С.Сидорова</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Обзор звездных датчиков космического аппарата.....	9
1.1 Звездные датчики.....	10
1.1.1 Принцип работы звездных датчиков.....	14
1.1.2 Область применения звездных датчиков.....	14
1.1.3 Сравнительный обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов.....	15
1.2 Имитаторы звездного неба.....	19
1.2.1 Статические имитаторы.....	24
1.2.2 Динамические имитаторы.....	25
2 Постановка задачи исследования.....	28
3 Разработка динамического имитационного стенда отработок звездного датчика.....	30
3.1 Разработка структурной схемы стенда.....	30
3.2 Функциональная схема прибора.....	32
3.3 Описание функционирования и основных характеристик стенда.....	33
4 Разработка конструкции и устройства динамического имитационного стенда	35
4.1 Описание конструкции.....	38
4.2 Анализ и выбор элементной базы.....	45
4.3 Расчет надежности конструкции.....	55
5 Разработка макета динамического имитационного стенда.....	60
5.1 Состав макета.....	60
5.2 Программное обеспечение.....	60

Заключение.....	62
Список сокращений.....	65
Список использованных источников.....	66

ВВЕДЕНИЕ

Развитие космической техники во многом связано с совершенствованием систем управления космическими аппаратами. 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 (ОЭП) или астроприборы, определяющие угловое положение аппарата относительно космических источников излучения (космических ориентиров) – звезд, Солнца, планет (в том числе Земли). Эти приборы на современных КА могут обеспечивать в составе системы управления решение четырех основных задач – ориентации, коррекции, навигации и определения положения (индикации) осей КА в условиях космического пространства. Общепризнанным является разделение приборов по типам используемых ими космических ориентиров. По этому признаку выделяются три типа приборов – приборы ориентации и навигации по звездам, по Земле, по Солнцу (звездные, земные и солнечные).

Звездным датчиком называется оптико-электронный прибор в составе космического аппарата, предназначенный для определения его текущей ориентации в космическом пространстве. Данный прибор является крайне важным узлом системы ориентации КА в космосе и путем нахождения ориентации позволяет сохранить аппарат даже при потере ориентации в пространстве [9]. Так как звездные датчики предназначены для функционирования в условиях космоса, то возникает задача проведения предварительных испытаний данного типа приборов на земле. Данную задачу позволяют решить имитаторы звездного неба.

Настоящая магистерская диссертация посвящена исследованию мобильной модификации динамического имитатора звездного неба. Исследуемый имитатор выполняется в виде стенда и предназначен для выполнения наземных отработок звездных датчиков. Имитатор предназначен

для создания малоразмерных светящихся объектов, похожих на звезды. В составе стенда используется излучатель, имитирующий точечные источники излучения определенного спектрального диапазона и заданного диапазона эквивалентных освещенностей. Таким образом, благодаря имитатору становится возможным выполнение практически неограниченного количества испытаний датчика, вследствие чего минимизируется вероятность возникновения сбоев датчика при работе в реальных условиях космического пространства.

В первой главе магистерской диссертации выполнен сравнительный обзор звездных датчиков, а также рассмотрены принципы работы и устройство статических и динамических имитаторов звездного неба.

Во второй главе выполнялась постановка цели и задачи исследования.

Третья глава диссертации посвящена разработке динамического стенда имитации звездного неба. В пунктах данного раздела производилась разработка структурной схемы стенда, определен его состав и основные характеристики, а также описание функциональной схемы прибора.

В четвертой главе была выполнена разработка конструкции исследуемого стенда. Пункты раздела посвящены определению типа конструкции, а также аналитическому обзору и выбору элементной базы для реализации стенда. Проведены расчеты надежности разработанной конструкции.

Пятая глава посвящена описанию состава макета стенда, а также применяемого программного обеспечения.

1 Обзор звездных датчиков космического аппарата

Звездные датчики относятся к приборам определения ориентации космического аппарата. Определение ориентации датчиками ориентации осуществляется на основании измерения направлений базовых векторов. Базовыми векторами являются векторы направлений внешних по отношению к КА физических полей (например, геомагнитного, гравитационного, положений звезд). На рисунке 1 приведена общая классификация базовых векторов, применяемых и потенциально применимых для определения ориентации КА.

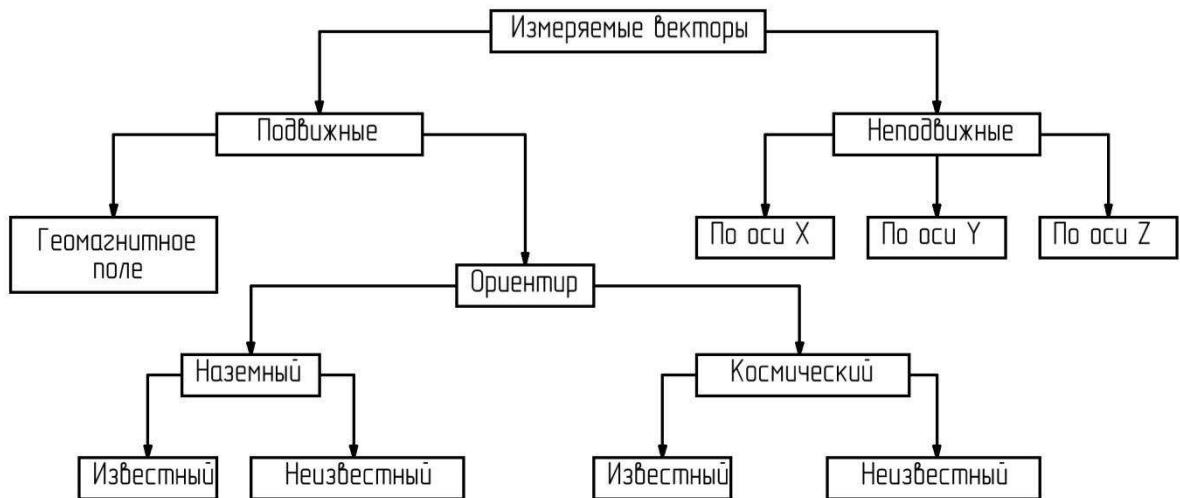


Рисунок 1 – Классификация базовых измеряемых векторов

С данной классификацией связаны типы разрабатываемых датчиков. Основное разделение базовых векторов сделано по их положению относительно системы координат: неподвижные (или малоподвижные) и подвижные.

Звездные приборы универсального типа разделяются на приборы с подвижным угловым полем (с подвижной визирной линией) и с неподвижным угловым полем (статические). Приборы с подвижным угловым полем отличаются достаточно узким полем (угловое поле составляет единицы

градусов в квадрате и менее). Так как положение углового поля может меняться относительно базы прибора и осей КА, для их работы достаточно небольшого количества звезд (до 3-3,5 звездной величины) [8]. Благодаря малому угловому полю эти приборы обладают высокой помехозащищенностью по отношению к световым помехам всех видов. Однако конструкция этих приборов достаточно сложна, так как в состав их входят прецизионные поворотные устройства, приводы, устройства преобразования углов поворота в код. Поэтому в таких приборах сложнее достичь высокой точности, надежности и большого срока службы.

Приборы с неподвижным угловым полем конструктивно менее сложны, что упрощает достижение высокой точности и надежности. Размер углового поля таких приборов составляет десятки и сотни градусов в квадрате. Так как угловое поле не может наводиться в произвольную область небесной сферы, для их работы требуется больше рабочих звезд (до 5–6 звездной величины и более) приводит к большой чувствительности к световым помехам.

Специализированные звездные приборы отличаются большим разнообразием, но в настоящее время можно выделить три группы, различающиеся как по назначению и выполняемым функциям, так и по конструктивным особенностям:

- звездные ОЭП солнечно-звездных систем ориентации КА;
- звездные ОЭП для ориентации по Полярной звезде в системе управления КА с геостационарной орбитой;
- приборы для КА, стабилизированных вращением.

1.1 Звездные датчики

Звездный датчик – прибор в составе космического аппарата, который предназначен для определения, нахождения ориентации. Данный прибор предназначен для определения матрицы перехода от системы координат

прибора к системе координат звездного каталога, которая приведена на текущую эпоху. Внешний вид датчика приведен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Внешний вид звездного датчика

Звездный датчик включает объектив, проецирующий изображение участка звездного неба на матрицу чувствительных элементов. Поскольку звезды видны в виде точек бесконечно малого размера, изображение звезды на матрице занимает один пиксель, и точность измерения направления близка к угловому размеру пикселя, т.е. может быть достаточно высокой. Для определения ориентации необходимо сравнить измеренное положение звезды (в приборной системе координат) с заданным в каталоге положением во 2-й экваториальной системе. Это может быть выполнено только после опознания звезды – идентификации ее из числа множества звезд, доступных для наблюдения звездным датчиком (доступность для наблюдения определяется соотношением яркости звезды и чувствительности звездного датчика). Необходимо выполнить опознание для условий произвольной ориентации КА, т.е. пересмотреть звезды, расположенные на полной небесной сфере. Задача решается путем одновременного наблюдения нескольких звезд и опознания

создаваемого ими контура. Так астрономическая система индикации КА «Океан-1» включала 4 визира, каждый из которых выдавал направление на одну звезду. С учетом ограниченной чувствительности датчика и возможной засветки одной из головок Солнцем наиболее вероятно было наблюдение двух звезд. Опознание осуществлялось путем перебора всех возможных попарных сочетаний в каталоге из 400 звезд и поиска из них пары с угловым расстоянием, наиболее близким к измеренному. В качестве другого примера можно привести «Компактный автономный звездный датчик» производства компании Sodern. Визир этого прибора имеет угол зрения 25 градусов, одновременно в поле зрения могут наблюдаться до 10 звезд, вплоть до 5,5 звездной величины. В запоминающем устройстве прибора имеется каталог известных положений звезд. В этом каталоге вся небесная сфера разделена на сектора с угловым размером, равным полю зрения визира. В общем случае, при отсутствии предварительных сведений о вероятной ориентации, осуществляется поочередный перебор всего каталога по секторам. Опознание производится при совпадении звездного контура, наблюданного визиром, с аналогичным контуром, входящим в один из секторов.

Звездный датчик обеспечивает определение углов наклона аппарата относительно второй экваториальной системы координат. В настоящее время определены следующие требования к звездным датчикам:

- высокая точность определения ориентации 0,1 - 0,01";
- время обновления навигационной информации от 10 - 100мс;
- определение координат и угловых скоростей при скоростях вращения летательного аппарата до 15 - 30°/с.

Упрощенная схема применения звездных датчиков приведена на рисунке 3.

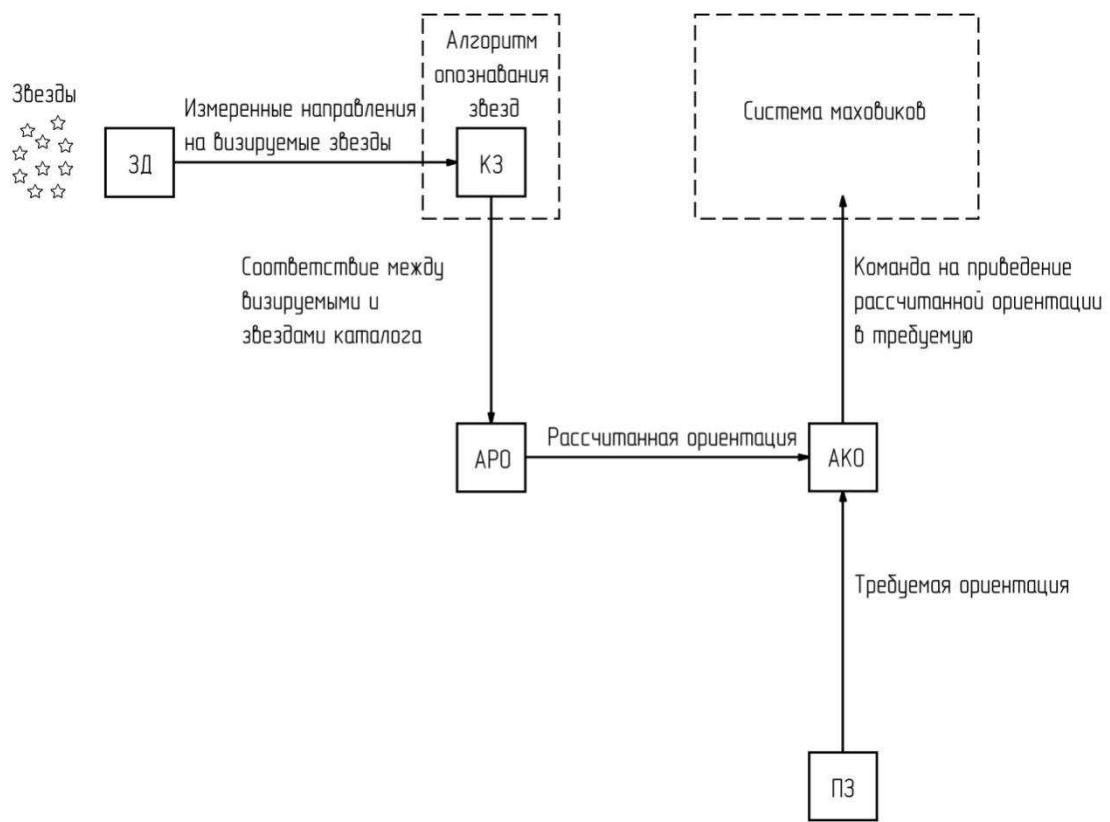


Рисунок 3 – Схема применения звездного датчика

На схеме приняты следующие обозначения:

- 1) ЗД – звездный датчик;
- 2) КЗ – каталог звезд;
- 3) АРО – алгоритм расчета ориентации;
- 4) АКО – алгоритм коррекции ориентации;
- 5) ПЗ – полетное задание.

При определении ориентации по наблюдениям опознанных звезд они рассматриваются как опознанные космические ориентиры. При отсутствии каталога и опознания эти наблюдения могут быть использованы, если повторно наблюдать одни и те же звезды. В этом случае из трех необходимых углов ориентации можно определить только два.

1.1.1 Принцип работы звездных датчиков

Звездный датчик реализует следующий принцип работы: оптическая система (объектив 3Д) выполняет построение изображения участка звездного неба на ПЗС-приемнике, который расположен в фокальной плоскости. Приемник осуществляет накопление излучения, а затем передачу получившееся изображения в блок обработки.

Бортовая система управления космическим аппаратом, получив изображение, выполняет следующие действия:

- 1) поиск изображений звезд на изображении фрагмента неба;
- 2) для найденных звезд оцениваются координаты их центров на ПЗС-матрице и значение блеска;
- 3) отождествление конфигурации звезд в поле зрения звездного датчика со звездами из бортового каталога с учетом помех;
- 4) определение углов ориентации звездного датчика и оценивание погрешностей их расчета;
- 5) прогнозирование входа и выхода звезд из поля зрения.

1.1.2 Область применения звездных датчиков

Областью применения звездных датчиков являются системы ориентации и навигации космических и летательных аппаратов. Звездные датчики в составе систем ориентации КА предназначены для решения следующих задач:

- 1) определение ориентации датчик – трех углов поворота относительно некоторой системы координат;
- 2) наведение некоторого устройства, установленного на КА, что в сравнении с первой задачей требует точного перенесения ориентации от звездного датчика к устройству;
- 3) нанесение на некоторое изображение, например, изображение Земли, координатной сетки – задача дистанционного зондирования Земли.

Анализ конструкций различных датчиков показывает, что все многообразие измеряемых ими параметров может быть сведено к двум простым геометрическим схемам. Базовый измеряемый вектор V может быть охарактеризован:

- 1) проекциями V_x , V_y , V_z на оси, связанной с прибором прямоугольной системы координат;
- 2) углами α , β , γ между проекциями X , Y , Z этой системы.

Измерения второго вида выполняет звездный датчик (из трех углов одновременно измеряются только два, этого достаточно, чтобы установить направление вектора). При использовании для определения ориентации фото (или телевизионного) изображения звездного неба геометрическая схема измерений также может быть сведена ко второму виду.

1.1.3 Сравнительный обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов

В таблице 1 приведены количественные значения основных характеристик наиболее распространенных звездных датчиков.

Таблица 1 – Основные характеристики существующих звездных датчиков

Наименование датчика	Точность σ_{xy}/σ_z , угл.с	Точность σ , угл. с	Максимальная угловая скорость град/мс	Частота обновления, Гц	Поле зрения, град	Масса, кг	Мощность потребления, Вт	Габаритные размеры, мм	Размеры оптического блока, мм	Формат матрицы
Astro15	1/10	-	2	4	14x1 4	6,15	-	192x552	-	ПЗС 1024x10 24
AA-Str	6/50	-	2	10	20x2 0	1,5	7	115x115 x183	-	КМОП 1024x10 24
Astro APS	2/15	-	5	10	20x2 0	1,8	9	120x120 x230	-	КМОП 1024x10 24
Caltrac	10/18	-	4	10	36x2 7	3	14	255x255 x330	-	ПЗС

Окончание таблицы 1

Наименование датчика	Точность σ_{xy}/σ_z , угл.с	Точность σ_z , угл. с	Максимальная угловая скорость град/мс	Частота обновления, Гц	Поле зрения, град	Масса, кг	Мощность потребления, Вт	Габаритные размеры, мм	Размеры оптического блока, мм	Формат матрицы
СТ-602	-	3	1,5	10	8x8	5,4	8	178x250	-	ПЗС 512x512
СТ-633	6/30	-	10	5	20x20	2,25	8	135x142	-	ПЗС 512x512
HE-5AS	3/16	-	2	4	22x22	2	8,5	-	234x379	ПЗС 1024x10 24
HD-1003	2/40	-	-	2	8x8	3,9	10	-	-	ПЗС
Hydra	-	6	10	30	23x23	5,1	15	-	162x162 x327	КМОП 1024x10 24
Sed16	3/18	-	20	10	25x25	3	7,5	160x170 x290	-	ПЗС 1024x10 24
Sed26	1/5	-	20	10	25x25	3,3	7	160x170 350	-	ПЗС 1024x10 24
Sed36	0,3/2	-	10	8	-	3,7	8,5	-	130x130 x460	ПЗС 1024x10 24
329К «Геофизика-Космос»	8/20	-	-	4	-	3	12	-	-	-
345К «Геофизика-Космос»	7/20	-	-	10	-	1,7	12	-	-	-
348К «Геофизика-Космос»	11	-	1	5	15x15	3,7	11	-	-	-
БОК3	2/20	-	0,15	0,3	8x8	4,5	11	450x230 x200	-	-
БОК3-М60	1/15	-	1,2	1	8x8	4	9	370x230 x230	-	-
БОК3-М60/1000	1/10	-	2	4	18x18	4,5	10	420x230 x230	-	-

Основной тенденцией в разработке звездных датчиков является [6, 7, 15]:

- качественное улучшение объемно-массовых характеристик,
- увеличение ресурса работы приборов до 15 лет;

- увеличение надежности и стойкости к воздействию космического ионизирующего излучения, тяжелых заряженных частицы 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 3Д 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 [6]:

- 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.

Для проектирования звездных приборов важны те характеристики звезд, которые влияют на работоспособность и параметры этих приборов, определяют

принцип их построения. К таковым относится прежде всего интенсивность излучения звезд, а также спектральный состав этого излучения.

Интенсивность излучения звезд характеризуется блеском, под которым понимается величина, измеряемая в звездных величинах. Освещенность на входе звездного прибора от самой яркой из звезд Сириуса $\sim 4 \cdot 10^{-6}$ лк, а от самого мощного источника помех – Солнца $1,4 \cdot 10^5$ лк. Уже из сопоставления этих чисел становится понятным, что должно существовать большое количество естественных и искусственных источников излучения, которые создают помехи для работы такого прибора.

Фоновые помехи – помехи, источники которые находятся в пределах углового поля прибора. Можно отметить следующие источники таких помех:

- свечение ночного неба;
- световые природные явления в верхней атмосфере Земли (полярные сияния, серебристые облака и др.);
- газопылевое окружение КА, освещенное Солнцем.

Общая помеховая обстановка для звездного прибора на КА определяется совокупностью перечисленных факторов и может быть весьма сложной. По пространственно-временным характеристикам световые помехи могут быть разделены на следующие составляющие:

- фон постоянной яркости, равномерный в пределах углового поля; в чистом виде такого фона реально не существует, однако такое представление удобно для сопоставления и анализа различных технических решений;
- распределенный фон, медленно меняющийся в пределах углового поля, характеризуется максимальной и минимальной яркостью и градиентом яркости;
- сосредоточенные (квазиточечные) помехи, угловой размер которых соизмерим или меньше углового размера элементарного анализатора в приборе, характеризуются вероятностным распределением источников по положению в пространстве, силе света, угловой скорости перемещения и другим параметрам;

- быстроменяющийся во времени (импульсный) фон, характеризуется амплитудой импульса яркости, его длительностью, временем нарастания и спада.

Перечисленные составляющие характеризуют внешнюю по отношению к прибору фоновую обстановку. В приборах, построенных на основе многоэлементных приемников (матричных, линейчатых), возникает специфический внутренний фон, порожденный неравномерностью темнового сигнала отдельных элементов и неравномерностью их световой чувствительности. Это так называемый «геометрический шум» (в отличие от «временного шума», порождаемого флюктуациями электрического тока в фотоэлектрическом тракте), характерный для приборов с многоэлементными приемниками. Этот шум содержит несколько составляющих (коррелированные, некоррелированную), для его описания могут использоваться различные модели, в том числе и двухуровневая «эвристическая» модель случайного фона. В любом случае вид и параметры модели должны определяться на основе экспериментальных данных.

1.2 Имитаторы звездного неба

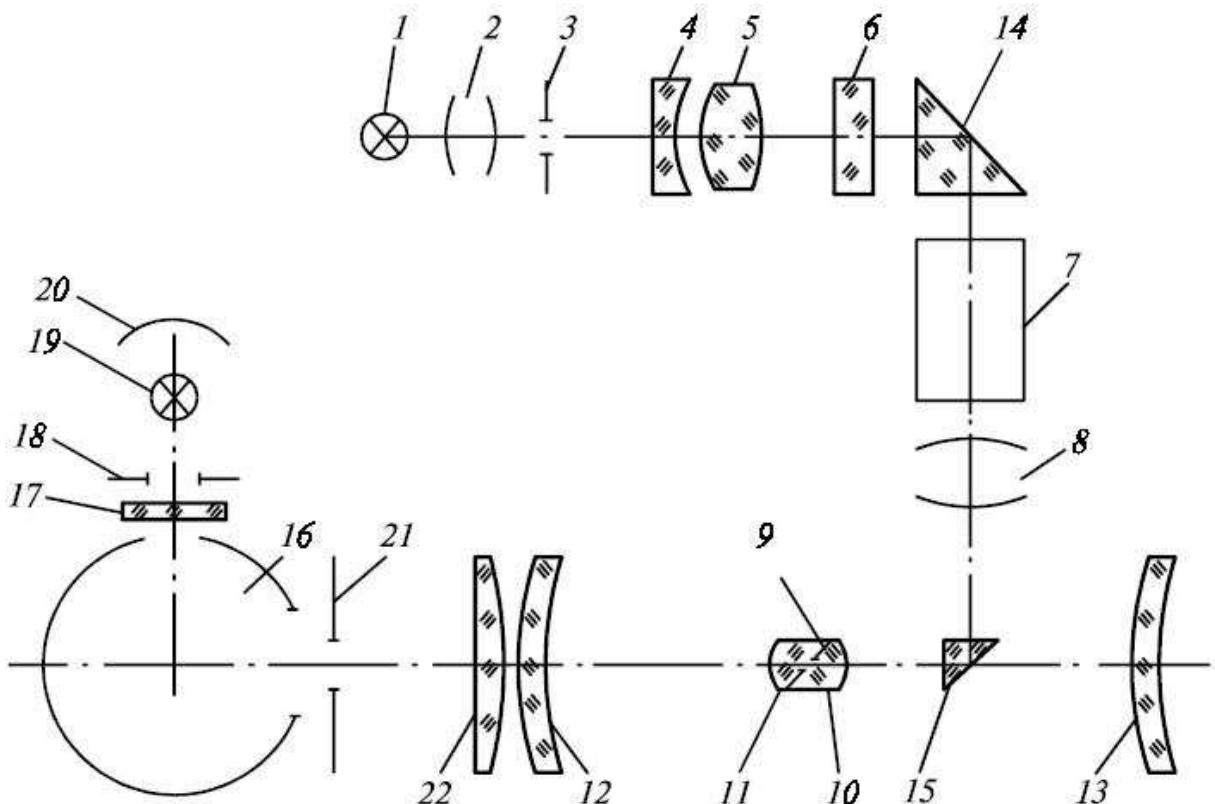
Рано или поздно перед разработчиками приборов космического назначения встает вопрос о создании различного рода имитаторов, позволяющих в наземных условиях воссоздать те или иные факторы космического пространства. Использование таких имитаторов на стадии наземной отработки приборов позволяет проверить различные режимы функционирования приборов, устранить возникающие неполадки в их работе, усовершенствовать программное обеспечение. При этом необходимо, чтобы разработчики обеспечивали высокую степень достоверности моделирования на имитаторах, действующих на прибор факторов. Имитаторы звёздного неба бывают статическими и динамическими. Статические имитаторы позволяют

спроектировать в поле зрения звёздного датчика изображения точечных объектов. Динамические имитаторы дают возможность моделирования движения точечных объектов в поле зрения звёздного датчика [15].

Имитаторы астрономических источников излучения, как и астроприборы, можно разделить на два типа: универсальные и специализированные. Универсальные имитаторы могут использоваться как самостоятельные приборы или как узлы, входящие в состав того или иного стенда, предназначенного для испытаний конкретного прибора или группы однотипных приборов.

Имитаторы соответственно подразделяются на имитаторы звезды (звезд), фона, Земли и Солнца. При этом могут иметь место существенные конструктивные различия между имитаторами, используемыми для имитации источника излучения в качестве ориентира или того же источника в качестве оптической помехи. Как и астроприборы, рассматриваемые имитаторы астрономических источников излучения могут работать как в видимом спектральном диапазоне, так и в инфракрасном [16, 18].

Рассмотрим наиболее распространенный универсальный имитатор звезды и фона видимого диапазона, который используется в качестве излучателя, имитирующего точечные источники излучения определенного спектрального диапазона и заданного диапазона эквивалентных освещенностей (канал точки) и в заданном диапазоне яркости фона (канал фона) [16]. Функциональная схема имитатора приведена на рисунке 4.



1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – диафрагма; 4, 5 – объектив; 6 – корригирующий светофильтр; 7 – ослабитель светового потока; 8 – объектив; 9 – точечная диафрагма (полевая диафрагма канала точки); 10, 11 – линзы; 12 – сферическое зеркало (линза); 13 – линзовый мениск; 14, 15 – призмы; 16 – фотометрический шар; 17 – светофильтр; 18 – щелевая диафрагма; 19 – лампа; 20 – рефлектор; 21 – полевая диафрагма канала фона; 22 – линза

Рисунок 4 – Функциональная схема универсального имитатора звезды

В канале точки светящееся тело лампы накаливания 1 осветительного узла проецируется конденсором 2 в плоскость диафрагмы 3, расположенной в фокальной плоскости объектива 4, 5 коллиматорной трубы, в параллельном пучке лучей которого стоит корригирующий светофильтр 6. Этот светофильтр, обеспечивающий преобразование спектра лампы накаливания 1 в спектр звезды G2-V (спектр Солнца), может дискретно выводиться (вводиться) из светового пучка лучей. После коррекции излучение проходит через ослабители светового потока 7 и объективом 8 фокусируется в плоскость точечной диафрагмы, расположенной между линзами 10 и 11. Наклон диафрагмы обеспечивает исключение сфокусированных бликов в системе «имитатор звезды–

роверяемый звездный прибор». Преломляющие поверхности линз 10, 11 концентричны центру точечной диафрагмы 9, которая совмещена с фокальной плоскостью объектива, состоящего из сферического зеркала 12 и мениска 13. Призмы 14, 15 служат для изменения направления хода лучей.

Имитатор обеспечивает имитацию звезд с возможностью изменения их блеска в диапазоне 8 звездных величин, что соответствует изменению освещеностей на его выходном зрачке примерно в 1600 раз. Такой перепад освещеностей формируется ослабителем 7, который состоит из следующих трех элементов:

1) дискретно вводимой (выводимая) кварцевой пластины с нейтральным светофильтром;

2) плавным ослабителем, который представляет собой набор тонких пластинок, параллельных друг другу и в исходном положении параллельных оптической оси имитатора, помещенных в каркас, который может вращаться относительно оси, перпендикулярной оптической оси имитатора; при вращении каркаса с решеткой изменение видимых (в направлении светового потока) зазоров между пластинами изменит световой поток;

3) дискретного ослабителя, представляющего собой турель с одним свободным окном и двумя постоянными решетками (ослабителями), введение каждой из которых в световой пучок дискретно изменяет световой поток.

В рабочем положении решетки плавного и дискретного ослабителей взаимно перпендикулярны, что минимизирует влияние дифракции при формировании изображения имитируемой звезды. В канале фона излучение от лампы 19 с рефлектором 20 проходит через щелевую диафрагму 18, плавно регулирующую световой поток, и нейтральный светофильтр 17, дополнительно дискретно ослабляющий световой поток, попадает в фотометрический шар 16 и, многократно отражаясь от стенок шара, равномерно освещает полевую диафрагму 21, находящуюся в фокальной плоскости трехлинзового объектива (линзы 22, 12, 13), после которого идет параллельным пучком.

Основные технические характеристики имитатора:

- выходной световой диаметр объектива 100 мм;
- диаметр нерабочей зоны в центре объектива 12 мм;
- угловой размер точки не более 5'';
- диапазон звездных величин m_V канала точки от $-2,^m0$ до $+6,^m0$;
- стабильность положения визирной линии канала точек имитатора относительно его базовых плоскостей при изменении освещенности в пределах всего рабочего диапазона величины m_V и в течение непрерывной работы, до 8 ч включительно, должна быть не хуже 2'';
- рабочий спектральный диапазон канала точки от 0,36 до 1,1 мкм;
- номинальный спектр излучения канала точки соответствует спектру звезды G2-V;
- источник излучения канала точки – лампа СИРШ6-100-1;
- угловой размер фона не менее 3°;
- диапазон изменения яркости фона от 50 до 10^{-3} кд/м²;
- рабочий спектральный диапазон канала фона от 0,36 до 1,1 мкм;
- спектр излучения канала фона соответствует источнику типа А.

Следует отметить, что на практике многие образцы имитаторов имеют стабильность положения визирной линии не хуже 1''. Имеется также модификация рассмотренного имитатора, в котором канал фона отсутствует. На основе осветителя с фотометрическим шаром рассмотренного имитатора создан имитатор фона для звездных астроприборов. Его основные технические данные:

- входной световой диаметр объектива 100 мм;
- угловое поле 11°;
- диапазон имитируемых яркостей до 100 кд/м².

Имитатор фона состоит из осветителя с фотометрическим шаром, с выходным отверстием которого совмещена передняя фокальная плоскость однолинзового объектива.

1.2.1 Статические имитаторы

Чаще всего статический имитатор представляет собой конструкцию, устанавливаемую на бленду звёздного датчика вместо технологической крышки. Внутри имитатора располагаются различные отверстия и светодиоды за каждым отверстием. При подаче питания светодиоды загораются и в поле зрения прибора проецируются точечные объекты. С помощью такого имитатора проверялась правильность работы оптико-электронного тракта звёздного датчика. Разработкой имитаторов звёздного неба в России занимается отдел оптико-физических исследований ИКИ РАН.

Статические имитаторы разработки ИКИ РАН:

- Имитатор ИЗ-02 был разработан в 2002 году для проверки оптико-электронного тракта приборов БОКЗ-М. Имитатор устанавливается на бленду прибора вместо технологической крышки на время проведения испытаний. Внутри имитатора располагается металлическая пластина с пятью отверстиями в форме креста, светодиоды за каждым отверстием и коллиматорный объектив, используемый для формирования параллельного светового пучка от каждого отверстия. При подаче питания светодиоды загораются, и в поле зрения прибора через коллиматорный объектив проецируются пять точечных объектов.
- Имитатор ИЗ-05 функционально аналогичен ИЗ-02 и предназначен для проверки оптико-электронного тракта приборов БОКЗ-МФ.
- Имитатор ИЗН-07 предназначен для проверки функционирования приборов БОКЗ-М60 в штатных режимах ориентации. Он также используется в качестве технологической защитной крышки, предохраняющей бленду от загрязнений. ИЗН-07 устанавливается на бленду прибора перед отправкой его к заказчику и снимается с прибора, установленного на КА, при подготовке к запуску. В состав ИЗН-07 входят слайд, светодиод и коллиматор, такой же, как и в ИЗ-04. Подача питания на ИЗН-07 может осуществляться двумя способами:

от БКПиК КИА БОКЗ- М60 напряжением +5В или от бортовой сети напряжением +27В.

– Имитатор ИЗН-08 Аналогичен имитатору ИЗН-07, но имеет другую конструкцию, позволяющую использовать его на бленде прибора БОКЗ-М60/1000.

– Имитатор ИЗ-04 обладает расширенными функциональными возможностями в сравнении с ИЗ-02 и ИЗ-05 и позволяет проверять функционирование приборов БОКЗ-М в штатных режимах ориентации. В ИЗ-04 пластина с отверстиями заменена на слайд, в качестве подсветки слайда используется один светодиод. Слайд представляет собой изображение участка небесной сферы, угловой размер которого соответствует угловому полю зрения прибора. Звезды разных звездных величин отображаются на слайде разными по площади объектами белого цвета, фон слайда – черный.

Основные характеристики указанных приборов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные характеристики статических имитаторов ИКИ РАН

Название прибора	ИЗ-02	ИЗ-04	ИЗ-05	ИЗН-07	ИЗН-08
Питание, В	+5	+5, +27	+5, +27	+5, +27	+5, +27
Моделирование изображение	5 точечных объектов	Участок звездного неба	5 точечных объектов	Участок звездного неба	Участок звездного неба
Проверка оптико-электронного тракта	+	+	+	+	+
Проверка функционирования	-	+	+	+	+

1.2.2 Динамические имитаторы

Чаще всего динамический имитатор представляет собой жидкокристаллический монитор подающий изображение через коллиматорную линзу на звёздный датчик, и вся эта конструкция экранирована от света. На экране монитора включается изображение звёздного неба и через

коллиматорную линзу формируются параллельные пучки света от каждого точечного объекта, которые попадают в звёздный датчик.

Главная разработка ИКИ РАН в направлении динамического имитатора звёздного неба – приборы семейства КБИЗ. Коллиматорный блок имитатора звездного неба (КБИЗ) предназначен для испытаний приборов БОКЗ-МФ. КБИЗ имеет габариты, сопоставимые с габаритами прибора БОКЗ-МФ, что позволяет устанавливать его непосредственно на бленду прибора. Кроме того, тестируемый прибор может устанавливаться сверху на конструкцию имитатора. Для проведения работ с БОКЗ-М была создана модифицированная версия имитатора – КБИЗ-1. В качестве вычислительного устройства и одновременно экрана, на котором отражается звездное небо, в КБИЗ используется мини-ноутбук Sony VAIO VGN UX-180P. Управление мини-ноутбуком ведется с использованием протокола беспроводной связи Wi-Fi. Сравнительные характеристики приборов КБИЗ и КБИЗ-1 приведены в таблице 3.

Компания Airbus разработала свой динамический имитатор STOS (Star Tracker Optical Stimulator). Имитатор основан на микроразрешением 1280x1024. Подключается дисплей через интерфейсы DVI или HDMI. Обновление изображения на дисплее происходит с частотой до 225 Гц. Управляется такой имитатор с помощью стандартного персонального компьютера и программного обеспечения STOS Pilot. Расстояние между компьютером и дисплеем может достигать до 20 м.

Компания Jenoptic также разработала динамический имитатор звёздного неба. По конструкции он не сильно отличается от имитаторов, рассмотренных ранее. Устройство отличает использование дисплея с размером пикселя 15 мкм. Также прибор используется с программным обеспечением dSpace. Основные характеристики динамических имитаторов звезд приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные характеристики динамических имитаторов

Наименование прибора	КБИЗ	КБИЗ-1
Тестируемый прибор	БОКЗ-МФ	БОКЗ-М
Мини-ноутбук	Sony VAIO VGN UX-180P	Sony Vaio VGN-UX380N
Процессор	Intel, 1.20GHz	Intel, 1.33GHz
Оперативная память, Мб	512	1014
Видеoadаптер	Intel Graphics Media Accelerator (128MB)	Mobile Intel® 945 GM Express Chipset Family 224MB
Встроенная беспроводная локальная сеть	Intel® PRO/Wireless 3945ABG Network Connection (802.11a/b/g)	Intel® PRO/Wireless 3945ABG Network Connection (802.11a/b/g)
Операционная система	Microsoft Windows XP Professional	Microsoft Windows VistaBusiness
Разрешение, пикселей	1024 x 600	1024 x 600
Размер пикселя, мм	0,096 x 0,096	0,096 x 0,096
Фокусное расстояние коллиматора, мм	100±10	159,6±1
Угловой размер элемента, угл.сек.	200	125
Поле зрения, град.	66x33	35 x 21
Диапазон моделируемых угловых скоростей, °/с	0...5	0...5
Возможность удалённого управления работой	TCP/IP (Ethernet, WiFi)	TCP/IP (Ethernet, WiFi)
Частота обновления изображений небесной сферы, Гц	≤50	≤50
Габариты (ДхШхВ), мм	203 x 176 x 214	193 x 193 x 214
Масса, кг	4	1,65
Год изготовления	2008	2010

2 Постановка цели и задачи исследования

Целью работы является анализ возможной модификации динамических имитаторов звёздного неба, а также разработка макета стенда.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать требования, предъявляемые к современному имитатору;
- разработать структурную схему стенда проверки параметров звездных датчиков, определить состав стенда;
- разработать конструкцию стенда, определить требуемую элементную базу для реализации стенда, провести расчет надежности;
- разработать состав макета динамического имитатора звёздного неба.

При разработке конструкции и принципиального устройства динамического стенда отработок звездных датчиков принято решение исходить из следующих принципов:

- стенд должен обеспечивать формирование сфокусированного изображения звёздного неба без перефокусировки звёздного датчика;
- стенд должен быть относительно компактным, соизмеримым с размерами звёздного датчика и быть относительно мобильным;
- размытие изображения звезды должно определяться только кружком рассеяния оптической системы, т.е. угловой размер одного элемента имитатора должен быть в несколько раз меньше угла поля зрения звёздного датчика, приходящегося на 1 пиксел;
- частота обновления видеинформации на излучающем элементе должна быть более 50 Гц;
- стенд должен обеспечивать возможность выдачи в качестве изображения участок реального звездного неба с заданными координатами и заданной датой, временем, а также углом поля зрения;

- стенд должен обеспечивать возможность регулировки яркости свечения;
- в стенде должна быть обеспечена возможность регулировки цветовой температуры дисплея;
- прибор должен обеспечивать возможность формирования тестовых сигналов для оценки качества ТВ камеры и формирование изображения объектов с произвольной формой, размерами и энергетикой.

3 Разработка динамического имитационного стенда отработок звездного датчика

В данной главе рассмотрена разработка стенда, используемого для определения погрешностей измерений датчиков (ориентации и навигации КА). Это так называемые точностные стенды. Эти стенды по сравнению с другими наиболее сложные. Погрешности углового положения их визирных линий относительно посадочного места под прибор, определяющие точность стенда, в несколько раз меньше погрешностей испытуемых на них современных ОЭП ориентации и навигации КА, погрешности измерений которых от единиц угловых секунд до единиц минут. В зависимости от точности стенда формируются и требования к условиям его эксплуатации (по температуре воздуха, скорости изменения температуры воздуха, градиенту температуры помещения, атмосферному давлению, относительной влажности воздуха, запыленности воздуха в помещении и т.д.).

3.1 Разработка структурной схемы стенда

Обоснованием разработки структурной схемы является необходимость определения основных функциональных элементов и блоков стенда, что позволяет определить также основную взаимосвязь между ними. Элементы структурной схемы графически отображают разные по сложности функциональные узлы и блоки прибора [5].

Структурная схема стенда отработки звездных датчиков приведена на рисунке 5.

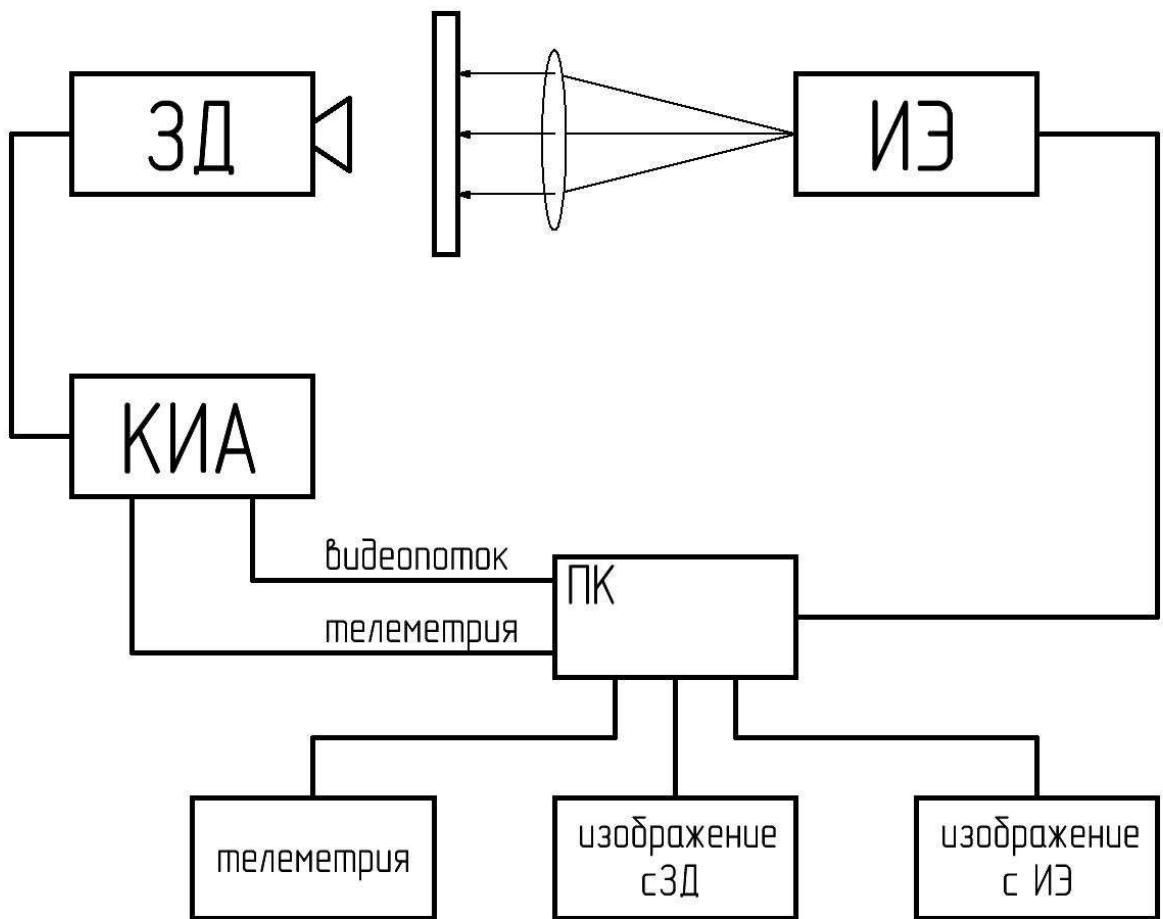


Рисунок 5 – Структурная схема стенда отработки звездных датчиков

На структурной схеме приведены следующие обозначения:

- 1) ЗД – звездный датчик;
- 2) Контрольно-измерительная аппаратура (КИА) – необходима для подключения звездного датчика к персональному компьютеру;
- 3) Излучающий элемент (ИЭ) – предназначен для формирования изображения звездного неба;
- 4) Персональный компьютер (ПК) – необходим для взаимодействия пользователя со стендом, выдачи команд для КИА, воспроизведения результатов имитации.

3.2 Функциональная схема прибора

Разработка функциональной схемы прибора производилась с целью определения состава элементов звездного датчика и связей между ними. Разработка данной схемы дает более глубокое представление о приборе и принципах его работы [5].

Функциональная схема звездных датчиков приведена на рисунке 6.

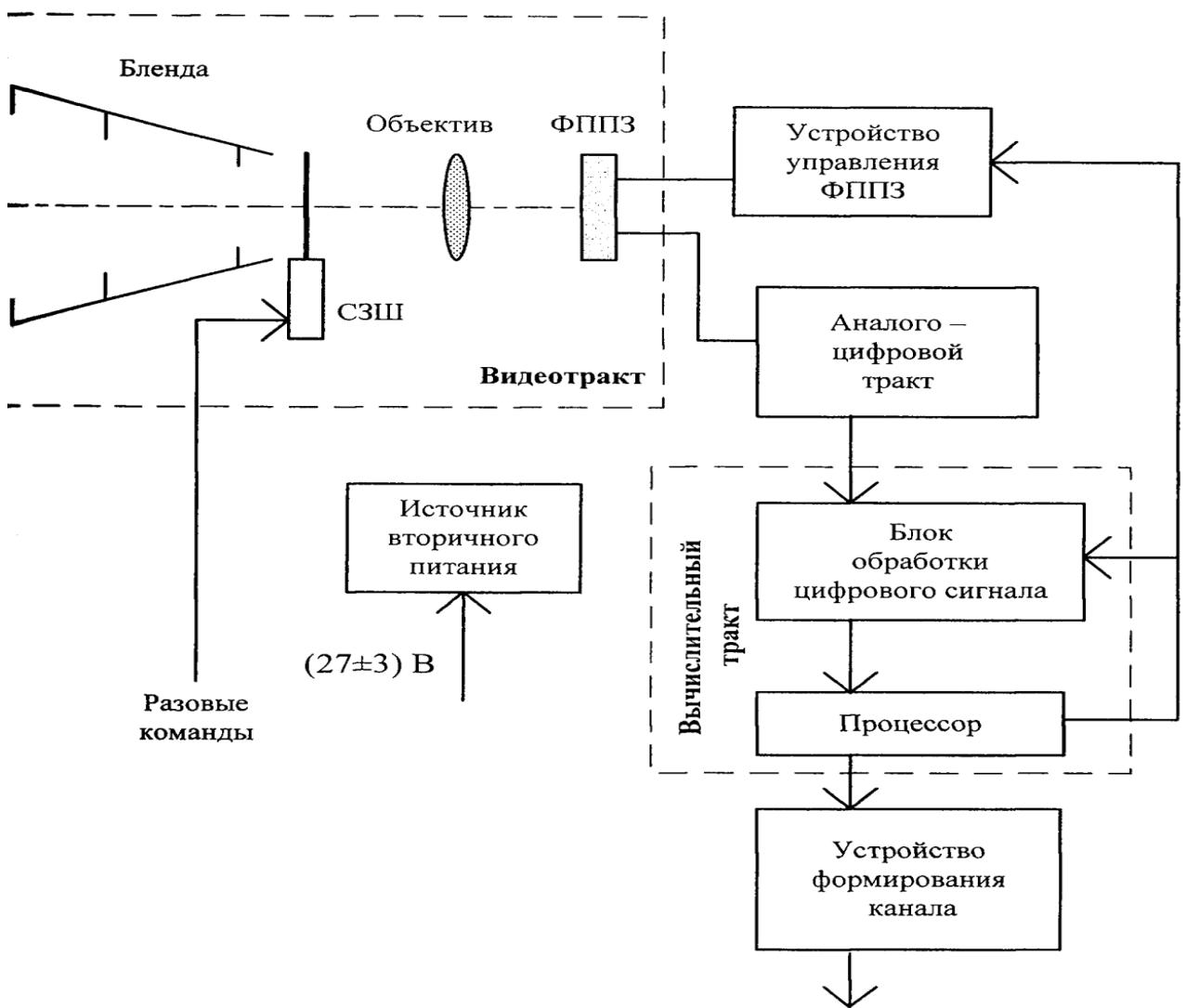


Рисунок 6 – Функциональная схема звездных датчиков

Схема прибора содержит:

- 1) 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;

2) 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 звездного датчика;

3) 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 видеинформации (режим «Поиск»), с целью сжатия её для последующей вторичной обработки в вычислительном тракте (режим «Измерение»).

3.3 Описание функционирования и основных характеристик стенда

В большинстве случаев при построении имитаторов не используются стандартные решения. Для подключения датчика к компьютеру применяется контрольно-проверочная аппаратура (КПА) являющаяся промежуточным звеном. КПА расшифровывает данные с ЗД и формирует один видеопоток и поток телеметрии. КПА позволяет принимать команды с ПК и транслировать их в ЗД. ПК через разъём USB принимает видеопоток и отображает его на мониторе. Затем принимает сигналы от КПА и с помощью специального

программного обеспечения, выводит телеметрию на экране монитора, а также через это программное обеспечение можно управлять параметрами ЗД. Для проверки работоспособности ЗД необходимо сформировать в его поле зрения оптическое изображение максимально соответствующее фоновоцелевой обстановке. Формирование данного изображения производится с помощью динамического имитатора звёздного неба. Оптическое изображение, формируемое излучающим элементом (размещается перед ЗД), проходит через коллиматорную линзу, которая обеспечивает параллельный ход лучей. Изображение, выводимое на имитаторе, выдается и воспроизводится с помощью ПК. Подключение осуществляется проводным либо беспроводным способом. Для контроля выводимого изображения оно дублируется на третьем мониторе.

4 Разработка конструкции и устройства динамического имитационного стенда

В данном разделе производилась разработка конструкции стенда для отработки звездных датчиков. Несущей конструкцией называют комплекс взаимосвязанных механических деталей и узлов, несущих на себе все схемные элементы, установочные детали и электрический монтаж. Основными узлами несущей конструкции радиоэлектронной аппаратуры являются приборные корпуса – стойки, каркасы, панели блоков и узлов. К несущей конструкции также относятся подложки, платы, основания, кронштейны, рамы и т. д [14].

При разработке несущей конструкции основными исходными параметрами являются:

- механическая прочность;
- жесткость и долговечность;
- надежность механических соединений;
- многофункциональность деталей и узлов;
- эффективность использования конструкционных материалов.

Удельный вес каждого из этих требований зависит от назначения узла или детали, области использования и условий эксплуатации.

Корпус макета является последним конструктивным уровнем и одновременно служит оболочкой, обеспечивающей безопасность обслуживания, защиту от механических повреждений и воздействий внешней среды.

Корпуса делятся между собой:

- 1) по конструктивным признакам – каркасы, кожухи, стойки, шкафы и контейнеры;
- 2) по характеру использования – навесные (навешиваемые на стену), стационарные (устанавливаемые на пол), настольные (устанавливаемые на стол) и носимые;

3) по технологическому признаку – литые, каркасные и бескаркасные, изготавливаемые из тонколистного проката.

При конструировании деталей несущей конструкции основные особенности заключаются в наличии значительного числа деталей, разнообразных по функциональному назначению, массе, размерам и материалам.

Силовой расчет данных деталей становится довольно трудоемким и малоэффективным. Поэтому механические характеристики большей части деталей не рассчитываются заново, а заменяются аналогами или опытными характеристиками деталей предыдущих разработок.

Особое внимание требуется уделить технологии изготовления деталей несущих конструкций – среди них выделяются следующие технологии:

- 1) литье;
- 2) прессование;
- 3) штамповка;
- 4) выдавливание;
- 5) гибка;
- 6) сварка;
- 7) экструзия.

Чаще всего детали несущей конструкции представляют собой оболочковые формы – кожухи, пластины, экраны и корпуса.

В целях обеспечения влагоустойчивости устройства к корпусу, содержащему блоки разрабатываемого устройства применяются:

- малогигроскопичные и коррозионностойкие материалы;
- стойкие антикоррозионные материалы;
- покрытия, предохраняющие поверхности от плесени;
- пленочные покрытия лаками, смолами, красками и компаундами;
- пропитка малогигроскопичными составами;
- заливка влагостойкими компаундами на основе эпоксидных смол;

- опрессовка пресс-материалами;
- механическая герметизация узлов и блоков;
- сушение внутренней полости прибора;
- вентиляция прибора воздухом влажностью до 75%;
- кондиционирование воздуха.

На рисунке 7 приведен график зависимости влажности воздуха от температуры.

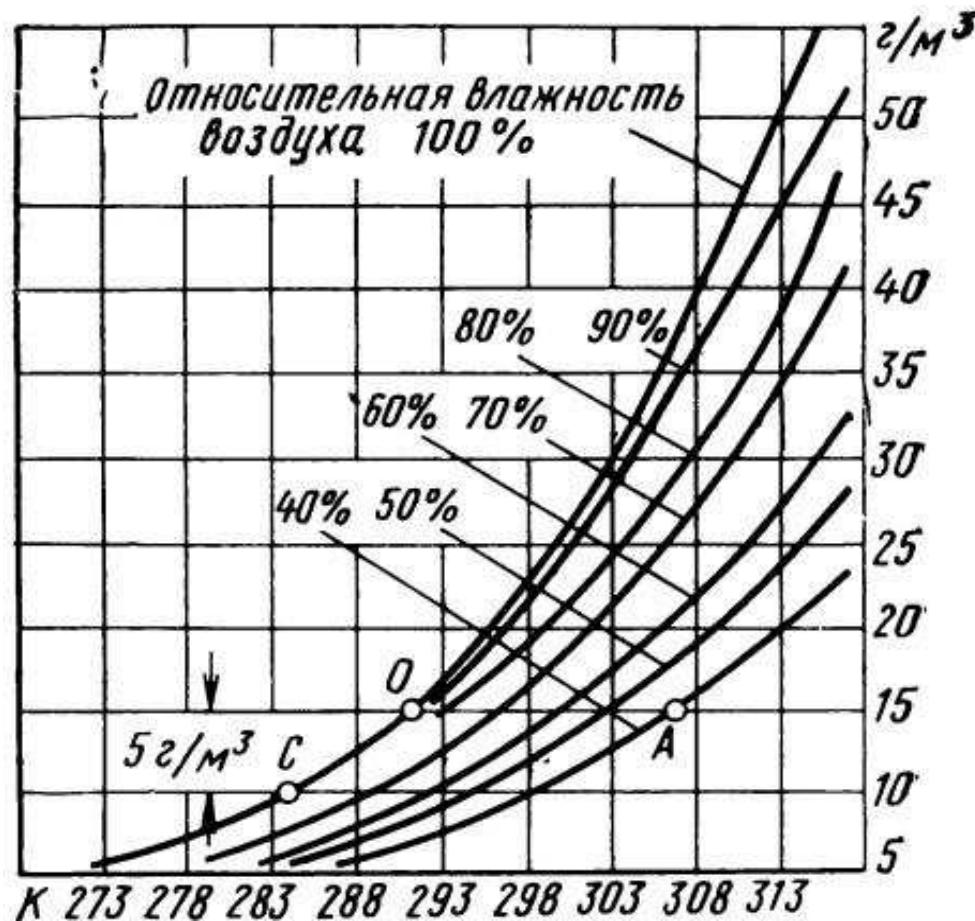
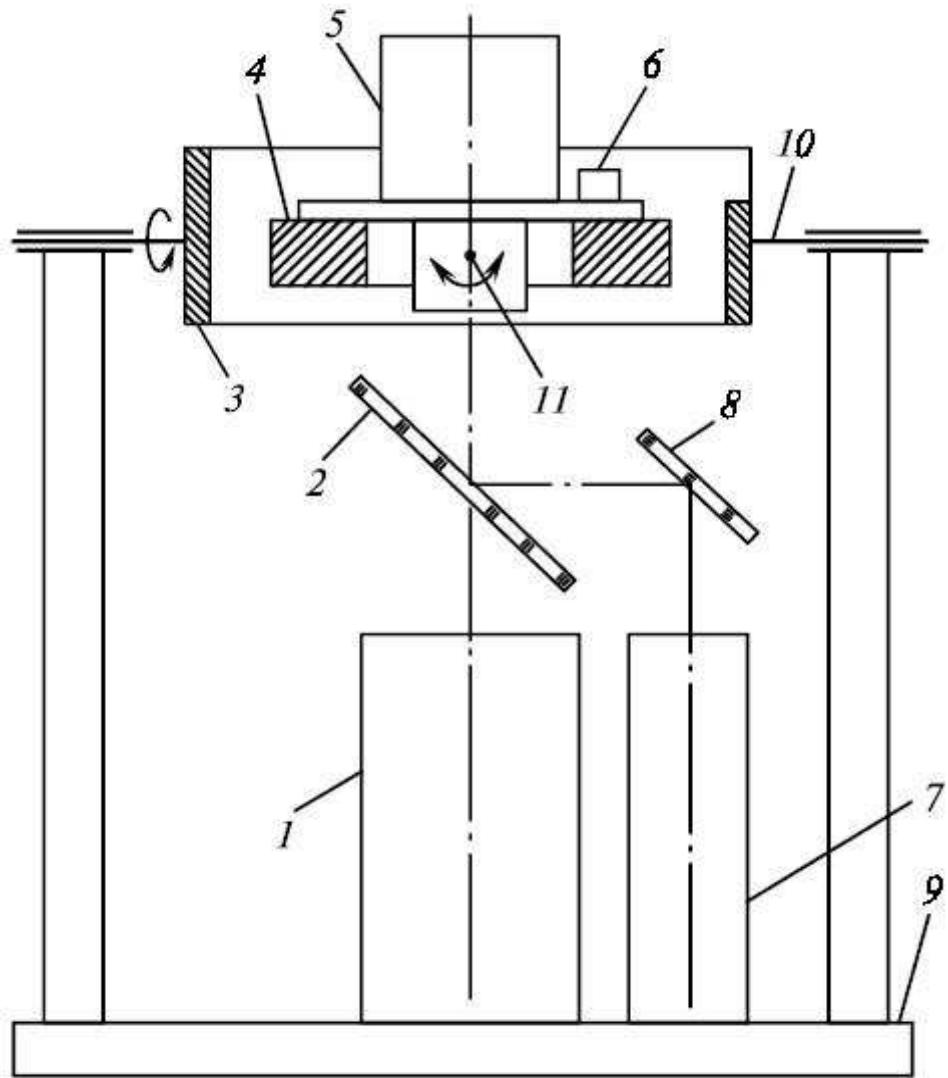


Рисунок 7 – Зависимость влажности воздуха от температуры

4.1 Описание конструкции

Для проведения точностных испытаний звездных датчиков наибольшее распространение получил тип стенда с посадочным местом в двухступенном подвесе. Общий вид конструкции стенда приведен на рисунке 8.



1 – имитатор звездного неба; 2 – светоделительная пластина; 3 – внешняя рамка подвеса; 4 – внутренняя рамка подвеса; 5 – испытуемый звездный датчик; 6 – зеркальная призма (куб); 7 – имитатор оптической помехи; 8 – плоское зеркало; 9 – основание; 10 – ось внешней рамки подвеса; 11 – проекция оси внутренней рамки подвеса

Рисунок 8 – Стенд с посадочным местом в двухступенном подвесе

Излучение от имитатора звездного неба 1, установленного на основании 9, пройдя светоделительную пластину 2, попадает во входной зрачок испытуемого астроприбора 5, установленного в двухстепенном подвесе стенда. Оси подвеса взаимно перпендикулярны. Как правило, при проектировании стенда стремятся, чтобы эти оси пересекались в центре входного зрачка испытуемого астроприбора (точка 11). На осях подвеса установлены датчики углов поворота его рамок и привода для их разворота (ручные или электрические).

Обычно имитатор звездного неба представляет собой коллимирующий объектив, который формирует параллельные пучки излучения. В этом случае небольшая децентрировка выходного зрачка коллимирующего объектива относительно входного зрачка испытуемого астроприбора не приводит к снижению точности измерений. Вообще в этом случае входной зрачок испытуемого астроприбора является, по существу, выходным зрачком имитатора звездного неба [16].

Если необходимо проверять точность астроприбора при воздействии оптических помех, то на стенде размещают имитатор помехи. Если требуется имитировать фоновую или точечную помеху, то излучение от имитатора помехи 7, последовательно отразившись от зеркала 8 и светоделителя 2, поступает во входной зрачок звездного датчика. Если необходимо имитировать боковую помеху, то зеркало 8 и светоделитель 2 убирают, а имитатор боковой помехи устанавливают на стенде так, чтобы его визирная линия проходила через центр входного зрачка астроприбора (или центр входного окна его бленды) и образовывала с визирной линией имитатора звездного неба 1 заданный угол. Посадочное место стенда представляет собой плоскость, на которой имеется или два штифта, или упоры. Указанная плоскость и прямая, касательная к штифтам, физически формируют базовую систему координат стенда. Базовая система координат звездного датчика

формируется аналогично – его посадочной плоскостью и линией, касательной к отверстиям под штифты или упоры.

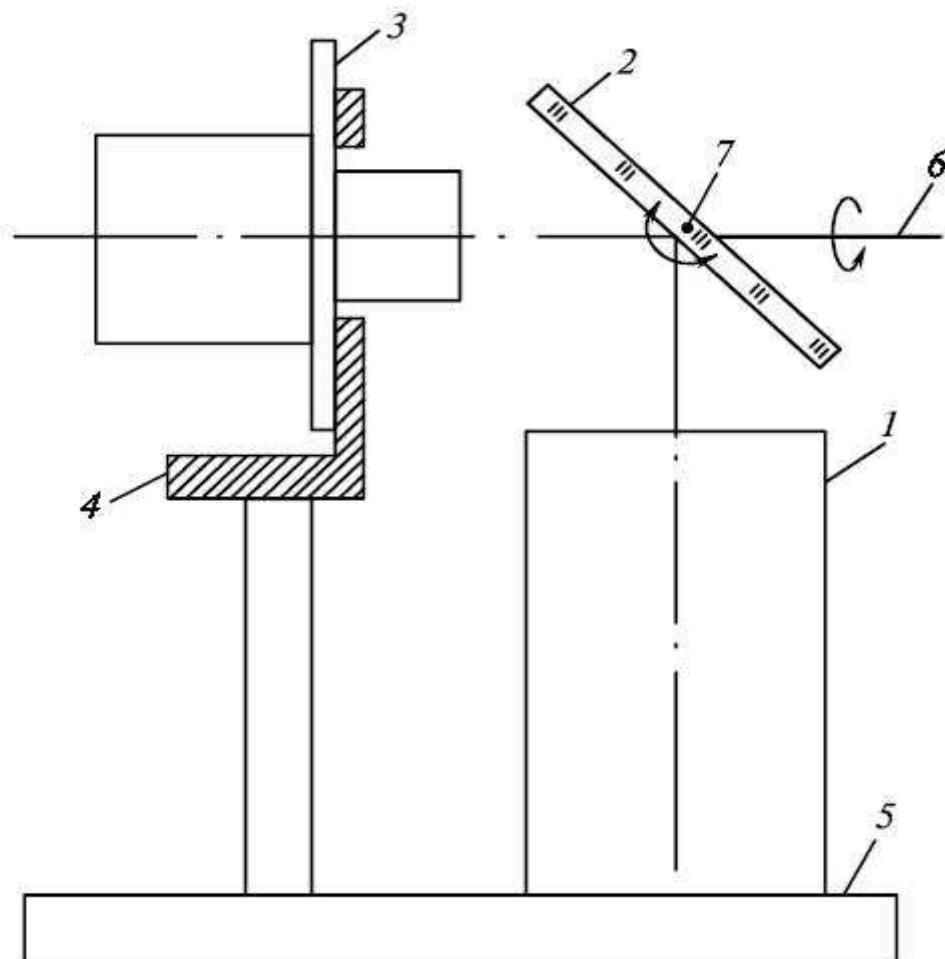
Существует и другой способ формирования базовой системы координат астроприбора. На корпусе звездного датчика вблизи его посадочного места жестко устанавливают зеркальную призму 6. Обычно это зеркальный кубик. Указанная призма и является физическим носителем базовой системы координат. При этом угловые положения нормалей к граням зеркальной призмы относительно посадочного места звездного датчика измеряются (аттестуются) с высокой точностью. Стабильность углового положения зеркальной призмы относительно посадочного места обеспечивается конструктивно. Результаты этих измерений являются паспортными параметрами датчика. Рассмотренный способ формирования базовой системы координат удобен при размещении (установке) астроприбора на КА и позволяет относительно просто реализовать оптическую (автоколлимационную) «привязку» базовой системы координат астроприбора к другим системам координат КА. Однако в этом случае вносится дополнительная погрешность, вызванная возможной нестабильностью крепления зеркальной призмы на корпусе. Если удается конструктивно реализовать указанные зеркальные грани на физическом носителе опорной системы координат (на канале геометрического эталона), то в этом случае точность угловых измерений повышается.

Часто, посадочное место, рассматриваемого типа стенда, выполняют таким образом, чтобы можно было устанавливать испытуемый прибор в два положения: «прямое» и с возможностью поворота прибора на посадочном месте вокруг приборной визирной линии на 180° . Благодаря этому в ряде случаев удается по специальной методике определить (разделить) погрешность испытуемого прибора и самого стенда [16].

Основным недостатком рассмотренного стенда является то обстоятельство, что испытуемый прибор устанавливается непосредственно

на двухстепенном подвесе. А это приводит к тому, что конструкция его рамок и опор (подшипников) должна исключать влияние массы проверяемого прибора на неизменность (стабильность) геометрической схемы подвеса.

Поэтому нашла применение схема стенда с неподвижным посадочным местом и с зеркальной сканирующей системой. Общий вид такого стендса приведен на рисунке 9.



1 – имитатор звездного неба; 2 – сканирующее плоское зеркало; 3 – испытуемый звездный датчик; 4 – посадочное место; 5 – основание; 6 – ось внешней рамки подвеса; 7 – проекция оси внутренней рамки подвеса

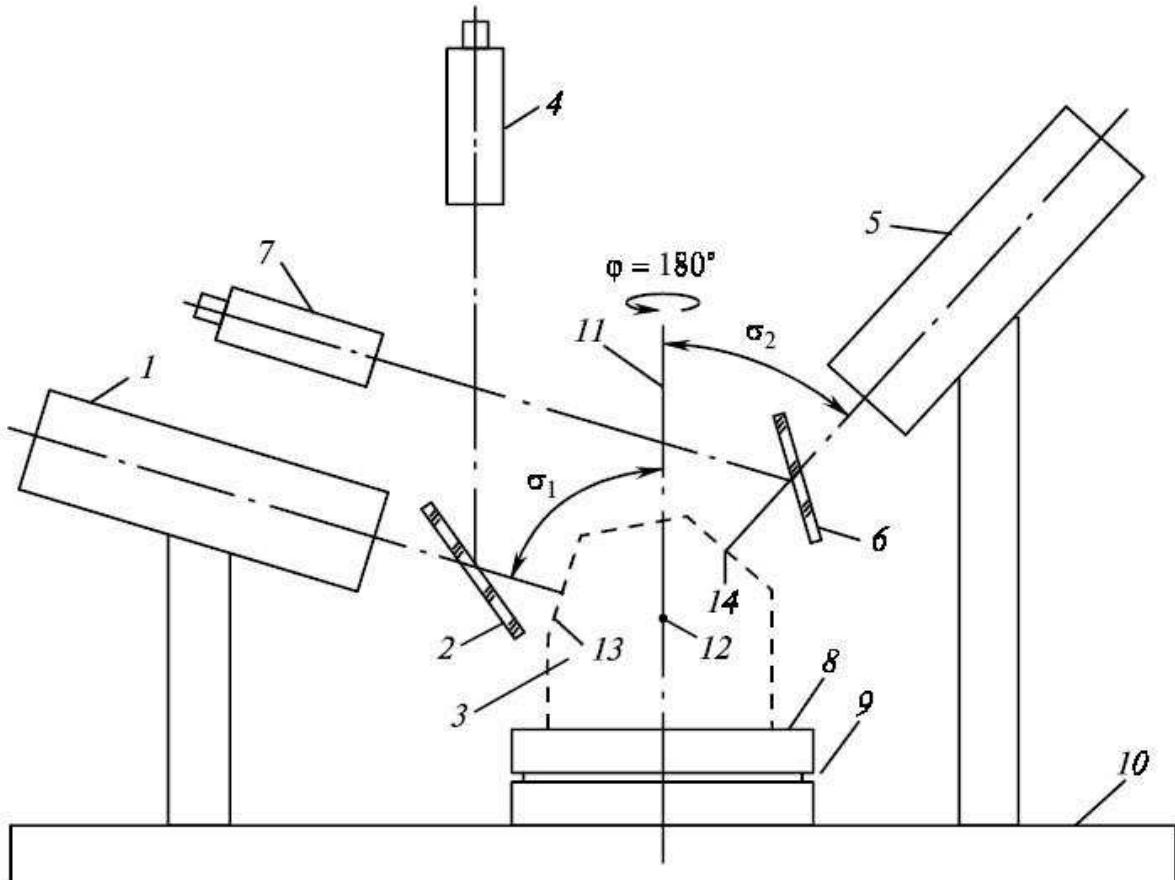
Рисунок 9 – Стенд с неподвижным посадочным местом и с зеркально-сканирующей системой

Излучение от имитатора звездного неба 1, установленного на основании 5, отразившись от плоского сканирующего зеркала 2, проходит во входной зрачок испытуемого астроприбора 3, размещенного на неподвижном посадочном месте 4. Зеркало 2 установлено подвижно в двухстепенном подвесе. Оси подвеса, как и в предыдущем стенде, взаимно перпендикулярны. При повороте зеркала вокруг оси 7 визирная линия имитатора отклоняется на угол, который можно назвать углом полярного радиуса, а при повороте зеркала вокруг оси 6 визирная линия имитатора отклоняется на угол, который можно назвать полярным. При этом происходит вращение изображения, которое необходимо учитывать при работе с этим стендом. Если в сканирующей системе этого стендад использовать два плоских зеркала, можно и в этом стенде избавиться от эффекта вращения изображения. Платой за это является существенное увеличение расстояния от выходного зрачка имитатора до входного зрачка испытуемого прибора, что приводит к увеличению габаритных размеров сканирующей системы и самого имитатора.

Основным недостатком стендад с неподвижным посадочным местом и с зеркальной сканирующей системой является то, что при повороте зеркала 2 вокруг оси 7 на угол ϵ визирный луч имитатора отклоняется на угол 2ϵ . А это означает, что погрешность выставки углового положения визирной линии имитатора увеличивается в 2 раза по сравнению с угловой погрешностью датчика угла поворота, установленного на оси 7.

При испытаниях высокоточных углеров необходимо выявлять нарушение взаимной перпендикулярности осей двухстепенного подвеса и их наклон по отношению к оси имитатора, а затем использовать значения этих параметров в качестве систематических погрешностей стендад и учитывать при работе стендад. Кроме того, значительно увеличивается расстояние от имитатора звездного неба до входного зрачка испытуемого прибора, что существенно усложняет конструкцию стендад [17].

Все это привело к тому, что появилась третья схема стенда, в которой двухступенчатой подвес исключен, а посадочное место стендса установлено подвижно с возможностью вращения только относительно одной оси. Общий вид такого стендса приведен на рисунке 10.



1, 5 – имитаторы астроориентира; 2, 6 – светоделительные пластины; 3 – оптический калибр; 4, 7 – автоколлиматоры; 8 – посадочная плоскость стендса; 9 – датчик угла поворота; 10 – основание; 11 – ось вращения датчика угла поворота; 12 – точка пересечения визирных линий имитаторов с осью вращения датчика угла поворота; 13, 14 – зеркальные грани

Рисунок 10 – Стенд с вращающимся посадочным местом

На основании 10 установлен датчик угла поворота 9, на подвижной части которого размещено посадочное место стендса 8. Датчик угла поворота может быть выполнен, например, в виде прецизионной делительной головки или многогранной зеркальной призмы, установленной с возможностью

вращения относительно оси 11. Углы нормалей граней призмы измерены и паспортизованы относительно «нулевой» грани призмы. Фиксация (измерение) угла поворота многогранной призмы с посадочным местом осуществляется автоколлиматором, установленным на основании 10, визирная линия которого в исходном положении многогранника совмещена с нормалью «нулевой» грани призмы.

Этот стенд предназначен в основном для проведения точностных испытаний звездных датчиков с подвижной линией визирования (типа теодолита), визирный блок которых снабжен блендоидом. Точка 12, расположенная на геометрической оси 11, расположена также в точке пересечения осей двухступенного подвеса датчика при его установке на посадочном месте стенда. При этом точка 12 является точкой пересечения визирных линий имитаторов звездного неба установленных на основании 10.

Светофильтровые пластины 2, 6 могут быть закреплены на стенде неподвижно. В этом случае их клиновидность на точность измерений не влияет. Если же конструкция крепления этих пластин выполнена «откидной» и при работе имитаторов с испытуемым прибором эти пластины выведены из рабочих пучков лучей, то их клиновидности необходимо учитывать в результатах измерений.

Существует ряд модификаций данного типа стендов. В ряде стендов нормаль к посадочной плоскости составляет заданный угол с осью вращения датчика угла поворота (наклонное посадочное место). Имеется стенд, у которого нет датчика угла поворота, а посадочное место стендса закреплено непосредственно на его основании.

Следует отметить, что данный тип стендса используется не только для проведения точностных испытаний углеров, построенных по типу теодолита, но и для калибровки их геометрической схемы. Упрощенно эту процедуру можно представить следующим образом. Создается математическая модель углерного прибора, в которой результаты

измерений угломера представляются через параметры его геометрической схемы, в том числе, через значение коллимационной ошибки, а также наклонов его горизонтальной и вертикальной оси подвеса прибора. На основе результатов нескольких измерений, проведенных на стенде с конкретным образцом угломера, и математической модели угломера составляется система уравнений, в которой коллимационная ошибка, наклоны горизонтальной и вертикальной осей входят как искомые величины. В результате решения этой системы уравнений вычисляются значения коллимационной ошибки, наклонов горизонтальной и вертикальной осей подвеса этого конкретного угломера. Далее указанные значения в качестве поправок (паспортных значений) используются для конкретного угломера в его алгоритме измерений угловых координат визируемой цели, в том числе и целей, имитируемых на данном стенде.

Недостатком рассмотренного типа стенда являются его большие габаритные размеры.

В данной работе принято решение о реализации стенда на основе второй рассмотренной схемы стенда с неподвижным посадочным местом и с зеркально-сканирующей системой. Выбор обусловлен необходимостью реализации мобильности стендса, а данный вариант конструкции предполагает наименьшие габариты стендса.

4.2 Анализ и выбор элементной базы

Для получения чёткого изображения звёздного неба камерой звёздного датчика, необходимо использовать коллиматор. Коллиматором принято называть устройство для получения параллельных пучков лучей света или частиц. Оптический коллиматор – это устройство для получения пучков параллельных световых лучей. Оптический коллиматор состоит из объектива (в простейшем случае вогнутого зеркала), в фокальной плоскости которого

помещён источник света малой величины. Наиболее часто таким предметом служит отверстие непрозрачной диафрагмы, например, узкая щель постоянной или изменяемой ширины. Простейший оптический коллиматор изображён на рисунке 8.

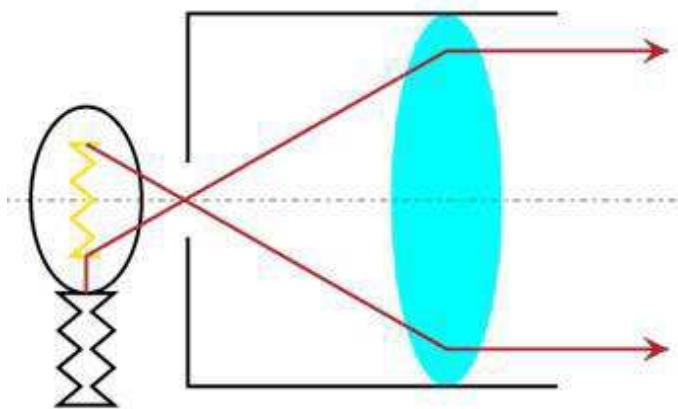


Рисунок 8 – Простейший оптический коллиматор

Относительное расположение объектива и источника фиксируется закреплением их в корпусе (обычно трубообразной формы). Зачернённые изнутри стенки корпуса поглощают лучи, направление которых не совпадает с оптической осью объектива. Неидеальность параллельного пучка, выходящего из коллиматора обусловлена конечным размером источника и аберрациями объектива. Фокусное расстояние, действующее отверстие и качество исправлений аберраций объектива, а также форма и размеры предмета выбираются в соответствии с назначением коллиматора и условиями его использования.

В качестве коллиматорного блока в данной диссертации решено использовать объектив.

Основные требования для объективов:

- объектив должен быть полноформатным;
- отношение объектива коллиматорной линзы к объективу камеры звёздного датчика должно быть больше 7.

– фокусное расстояние объектива должно быть более 175 мм.
(Объектив камеры звёздного датчика 25 мм).

Исходя из данных требований, можно предложить следующие варианты объективов:

1) Юпитер-6 – сменный светосильный длиннофокусный объектив с просветлённой оптикой для зеркальных фотоаппаратов. Разработан в 1949 году;

2) Юпитер-21 – длиннофокусный четырехлинзовый анастигмат с просветлённой оптикой и ирисовой диафрагмой с устройством для предварительной её установки. Имеется встроенная бленда. Объектив разработан в 1957 году;

3) Уран-9 – объектив для специальных видов фотографической съёмки. Разработан в 1942 году;

4) Рубинар – объектив с большим фокусным расстоянием, предназначенный для использования в качестве сменного к малоформатным однообъективным зеркальным фотоаппаратам;

5) Таир-56 – длиннофокусный объектив, предназначенный для любительской фотосъёмки.

Основные характеристики объективов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные характеристики объективов

Производитель объектива	Фокусное расстояние, мм	Угол поля зрения, град	Относительное отверстие	Разрешающая способность (центр/край), лин/мм	Назначение	Габариты, мм
Юпитер-6	180	14	От 1/2.8 до 1/22	35/16	Любительская фотосъёмка	145/Ø90
Юпитер-21	200	12	От 1/4.0 до 1/22	40/30	Любительская фотосъёмка	165/Ø78
Уран-9	250	54	1/2.5	30/10	Аэрофотосъёмка, оптическая проекция	-
МС Рубинар - 4,5/300 Макро	300	8	1/4.5	30/10	Астросъёмка	-
Таир-56	150	16	1/2.8	45/21	Любительская фотосъёмка	141/Ø77

Проведя обзор длиннофокусных объективов, можно сделать вывод, что объектив Рубинар подходит по всем основным требованиям. Таким образом, принято решение задействовать данный объектив в макете стенда.

Основным элементом динамического имитатора является дисплей, который обеспечивает требуемое разрешение и скорость обновления информации. В качестве отображающего устройства решено использовать цветной дисплей.

Основные требования для дисплея:

- частота обновления информации на дисплее должна быть более 50 Гц;
- разрешение экрана устройства должно быть максимальным (1920x1080 и выше);
- максимальное число пикселей на дюйм (ppi);
- для выполнения задачи минимизации всего устройства необходимо иметь излучающий дисплей сравнительно малых размеров. Прибор должен быть относительно компактным, соизмеримым с размерами звёздного датчика и быть относительно мобильным;
- устройство должно быть мультимедийным, т.е. должна обеспечиваться возможность выдачи в качестве изображения участок реального звездного неба с заданными координатами и заданной датой, и временем, а также углом поля зрения;
- возможность выдачи в качестве изображения участок реального звездного неба с заданными координатами и заданной датой, и временем, а также углом поля зрения;
- угловой размер одного элемента имитатора должен быть в несколько раз меньше угла поля зрения 3Д приходящегося на 1 пиксель;
- возможность регулировки яркости свечения;
- возможность регулировки цветовой температуры дисплея.

Главным среди этих требований является минимальный угловой размер элемента дисплея, т.е. размер пикселя. Он должен быть как можно меньше, а также частота обновления информации выше.

Ниже приведен обзор нескольких современных микродисплеев с подходящими функциональными возможностями.

Компания UTC AerospaceSystems разработала микродисплей, работающий на технологии OLED. Дисплей показывает чёткое, ясное и качественное изображение. Низкое потребление энергии и минимизация пространства являются главными достоинствами данного продукта. Внешний вид дисплея показан на рисунке 9.



Рисунок 9 – Дисплей компании UTC AerospaceSystems

Компания eMagin является ведущим производителем микродисплеев по технологии AMOLED. Эти дисплеи работают в расширенных диапазонах

температур и потребляют мало энергии. Также они обеспечивают высокое разрешение, качественное изображение и компактный размер. Помимо цветных, eMagin производят монохромные дисплеи. Внешний вид дисплеев показан на рисунках 10 и 11.



Рисунок 10 – Дисплей компании eMagin (цветной)



Рисунок 11 – Дисплей компании eMagin (монохромный)

Компания HOLOEYE Systems Inc. предлагает широкий спектр микродисплеев с разрешением 1920x1080 (HDTV). Эти дисплеи могут обеспечивать высокий контраст и яркость изображения. Устройство имеет твёрдое металлическое основание. Главная особенность этих дисплеев –

возможность обновления изображения с частотой до 180 кадров в секунду. Также компания разрабатывает монохромные дисплеи. Внешний вид дисплеев показан на рисунках 12 и 13.



Рисунок 12 – Дисплей компании HOLOEYE (цветной)



Рисунок 13 – Дисплей компании HOLOEYE (монохромный)

Jasper Display Corporation представляют дисплеи с самым высоким разрешением 4K (4096x2400). Устройства предназначены для домашних кинотеатров и проекторов.



Рисунок 14 – Дисплей компании Jasper Display Corporation

Forth Dimension Display. Преимущества дисплеев этой фирмы заключаются в высоком разрешении экрана и быстром обновлении информации до 550 кадров в секунду.



Рисунок 15 – Дисплей компании Forth Dimension Display

В таблице 4 приведены основные характеристики рассмотренных дисплеев.

Таблица 5 – Характеристики микродисплеев

Компани я производ итель	Разрешен ие	Минимал ьный размер элемента, мм	Размер дисплея, мм	Частота обновлен ия информа ции, Гц	Диагонал ь экрана, дюйм	Тип дисплея
UTS AEROSPACE SYSTEMS	873x 500	10	8,73x5	20 - 120	0,38	Цветной
eMagin Corporation	1280x 1024	12	15,36x 12,29	до 85	0,77	Цветной
eMagin SXGA-096	1280x 1024	9	12,4x9,9	30 - 60	0,62	Монохром ный
HOLOEYE Systems, Inc.	1920x 1080	5	-	до 180	0,177	Цветной
HOLOEYE HED 6001	1920x 1080	8	15,36x 8,64	60	0,7	Монохром ный
Jasper Display Corporation	4096x 2400	3,7	15,6x 9,2	-	0,7	Цветной
Forth Dimension Display	1280x 1024	-	17,92x 13,44	85	0,88	Цветной

Основными параметрами, влияющими на выбор микродисплея, являются минимальный угловой размер элемента дисплея, т.е. размер пикселя, частота обновления информации и разрешение дисплея. Размер пикселя должен быть как можно меньше, а частота обновления информации и разрешение дисплея – выше.

Обзор микродисплеев позволяет сделать вывод, что указанным требованиям удовлетворяют микродисплеи компаний Jasper Display Corporation и HOLOEYE. Эти дисплеи обладают наивысшим разрешением и наименьшим размером пикселя. При этом микродисплей компании HOLOEYE характеризуется также высоким значением частоты обновления информации. Поэтому было решено использовать данный дисплей в качестве излучающего элемента.

Звездный прибор выбран на основе сравнительного анализа, проведенного в первой главе. В качестве звездного датчика выбран прибор 348К предприятия «Геофизика-Космос».

Звездный датчик 348К предназначен для работы в составе систем управления ориентацией КА. Датчик измеряет угловое положение звезд относительно приборной системы координат, опознает участки звездного неба и определяет ориентацию КА в инерциальной геоцентрической системе координат. Датчик состоит из оптических блоков и общего электронного блока. Количество оптических блоков определяется целью миссии конкретного КА и составляет от 1 до 5.

Дублированный электронный блок может быть расположен как на внешней поверхности КА, так и внутри него. Оптические блоки связаны с электронным блоком кабелем длиной до 10 метров.

В составе прибора имеется набор бленд для защиты оптического блока от солнечных засветок для предельных углов 40° , 30° и 20° .

Основные характеристики датчика:

а) погрешность измерения оптического блока:

1) по осям X, Y – 10 угл. сек.

2) по оси Z:

- при одном оптическом блоке – 40 угл. сек.

- при двух и более оптических блоках – 10 угл. сек.

б) чувствительность – до +5 звездных величин;

в) темп обновления информации – 10 Гц.;

г) масса:

- оптического блока (без бленды) – 0,75 кг.

- электронного блока – 1,1 кг.

д) энергопотребление (1 электронный блок + 3 оптический блок) – 15 Вт.;

е) габариты:

- оптического блока (без бленды) – d70x108 мм.

- электронного блока – 190x130x45 мм.

4.3 Расчет надежности конструкции

Сила и характер воздействующих на аппаратуру внешних факторов зависит от условий эксплуатации. Возникающие при этом силы могут быть значительны по величине и продолжительны по времени. Они имеют место вследствие: ускорения, возникающего при вибрации основания, ударов при падении, механического воздействия или акустического удара [14].

Вибрации подвержена любая аппаратура, устанавливаемая в производственных зданиях и транспортных средствах. Под вибропрочностью устройства понимается его способность противостоять разрушающему действию вибрации в заданных диапазонах частот и при возникающих ускорениях в течение срока службы, а подвибоустойчивостью устройства – способность выполнения своих функций в условиях вибраций в заданных диапазонах частот и возникающих при этом ускорений.

Ударом называют мгновенное изменение скорости движения устройства на конечное значение. Время действия на макет ~~ударного~~ импульса силы движение ее происходит по закону вынужденных колебаний, а после действия – по закону свободных колебаний. Формой ударного импульса в простейших случаях может быть полусинусоида, трапеция или прямоугольник с длительностью до половины периода.

Практически удар может произойти в любом направлении, а нарастание и спад его измеряются долями секунды. Удары могут быть периодическими и непериодическими. К периодическим относят удары, которые повторяются через равные интервалы времени, к непериодическим – удары, повторяющиеся через неравные интервалы времени, например – удар при транспортной тряске и случайные удары. В результате действия ударов происходят колебания с большой амплитудой, действия которых могут вызвать значительные повреждения в аппаратуре, но благодаря применению демпфирующих свойств упругих элементов они быстро затухают [14].

Основным способом изоляции приборов от вибрации и ударов является применение упругих опор. В качестве таких опор используются резиновые, металлорезиновые или металлопружинные амортизаторы. Далее приведен расчет системы амортизации.

Масса звездного датчика 348К составляет 1,85 кг (электронный блок и бленда), масса объектива Рубинар по техническим условиям – не более 1,9 кг. Таким образом, масса стенда принята равной 3,8 кг. Следовательно, его вес G_m равен, примерно, 38 Н. Примем, что центр тяжести устройства совпадает с геометрическим центром и началом координат. Пусть максимальная частота вынужденных колебаний во время работы (а также при переноске) составляет 100 Гц, а допустимая действующая перегрузка равна 4 g. Для расчета изоляции устройства от вибрации и ударов необходимо произвести выбор амортизаторов, расчет коэффициента расстройки и передачи, эффективности виброзоляции.

Максимальная амплитуда колебаний макета будет определяться по формуле

$$A_0 = \frac{250j}{f_B^2}, \quad (5.1)$$

где j – перегрузка;

f_B – частота вынужденных колебаний.

$$A_0 = \frac{250 \cdot 4}{10^2} = 1 \text{ мм} = 10^{-1} \text{ м.}$$

Максимальная динамическая сила, действующая на устройство определяется по формуле

$$P = jG_m = 4 \cdot 38 \text{ Н} = 152 \text{ Н.} \quad (5.2)$$

Суммарная жесткость амортизаторов устройства

$$C = \frac{G_m}{A_0} = \frac{38 \text{ H}}{10^{-1} \text{ м}} = 380 \text{ H/m.} \quad (5.3)$$

Таким образом, нагрузка на один амортизатор

$$\rho_i = \frac{G_m}{n}, \quad (5.4)$$

где n – количество амортизаторов.

$$\rho_i = \frac{38 \text{ H/m}}{4} = 9,5 \text{ H.}$$

Жесткость каждого амортизатора определяется формулой

$$c_i = \frac{C}{n} = \frac{500 \text{ H/m}}{4} = 125 \text{ H/m.} \quad (5.5)$$

Согласно полученным результатам решено выбрать амортизаторы типа АП-3. Далее найдем собственную частоту амортизированного устройства

$$f_0 = \sqrt{\frac{c}{m}} = 4,87 \text{ Гц.} \quad (5.6)$$

Коэффициент расстройки определяется выражением

$$\gamma = \frac{f_b}{f_0} = \frac{10 \text{ Гц}}{4,87 \text{ Гц}} = 2,05. \quad (5.7)$$

Полученное значение удовлетворяет условию $\gamma = 0 \dots 5$. Пренебрегая демпфированием, как малой величиной, найдем коэффициент передачи

$$\varepsilon = \frac{1}{(\gamma^2 - 1)} = \frac{1}{2,05^2 - 1} \approx 0,29. \quad (5.8)$$

Эффективность виброизоляции определяется по формуле (5.9)

$$\varTheta = (1 - \varepsilon)100\% = 1 - 0,29 = 0,71 = 71\%. \quad (5.9)$$

Предположим, что макет подвергается непериодическим ударам с ускорением 10 г и длительностью ударного импульса 5 мс при направлении удара перпендикулярном его плоскости. Определим максимальное ускорение, действующее на устройство.

Период ударного импульса

$$T_i = 2t_i = 2 \cdot 5 \text{ мс} = 10 \text{ мс} = 0,01 \text{ с}, \quad (5.10)$$

где t_i – длительность ударного импульса.

Условная частота импульса

$$\omega_i = \frac{2\pi}{T_i} = \frac{2 \cdot 3,14}{0,01 \text{ с}} = 628 \text{ рад/с.} \quad (5.11)$$

Тогда коэффициент расстройки будет равен

$$\gamma = \frac{\omega_i}{\omega_0} = \frac{628}{116} = 5,42. \quad (5.12)$$

Ускорение, действующее на устройство, будет определяться следующим выражением:

$$u_{max} = \frac{2a\gamma}{\gamma^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\gamma} = 100 \frac{2 \cdot 5,42}{2,05^2 - 1} \cos \frac{3,14}{2 \cdot 2,05} = 14,17 \text{ g.} \quad (5.13)$$

Результат расчета подтверждает, что амортизаторы, выбранные для виброизоляции макета, удовлетворяют условиям изоляции от ударов.

5 Разработка макета динамического имитационного стенда

5.1 Состав макета

На основании ранее разработанных структурной и функциональной схем был определен следующий состав макета стенда отработок звездных датчиков. Макет будет содержать следующие элементы:

- 1) микроДисплей – для имитации звездного неба;
- 2) объектив – для получения чёткого изображения звёздного неба камерой звёздного датчика;
- 3) персональный компьютер – для обработки результатов измерений;
- 4) мониторы – в количестве 3 штук для дублирования изображения дисплея, изображения звездного датчика и вывода телеметрии;
- 5) осциллограф – для проведения анализа процессов, происходящих в камере звездного датчика;
- 6) блок питания – обеспечивает напряжение питания осциллографа и звездного датчика.

В качестве отрабатываемого звездного датчика решено использовать отечественный датчик 348К.

5.2 Программное обеспечение

В качестве программного обеспечения для формирования участка реального звёздного неба будут использоваться стандартные программы такие как Starcalc и Orbitron. Данные программы позволяют задавать угол поля зрения, время наблюдения, местоположение наблюдателя и другие параметры.

Для формирования тестовых сигналов и изображения с произвольной формой объекта решено использовать средства для обработки изображений такие как Paint, Adobe Photoshop, Corel Draw или подобные программы.

Для начала необходимо проверить способность камеры звёздного датчика различать изображение с имитатора звёздного неба. Интерес представляет оценка искажений, вносимых имитатором звёздного неба. Для оценки качества изображения, формируемого динамическим имитатором звёздного неба для звёздного датчика, необходимо создать ряд тестовых изображений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках магистерской диссертации было проведено исследование вариантов разработки и модификации стендов для отработки звездных датчиков.

В первой части диссертации был проведен литературный обзор темы диссертации. Определено понятие звездного датчика как ОЭП, рассмотрен принцип работы звездных датчиков, а также область их применения. Произведен сравнительный обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов. Также были рассмотрены имитаторы звездного неба – статические и динамические имитаторы.

Далее при выполнении диссертации был проведен анализ возможной модификации динамических имитаторов звёздного неба, а также разработан макет стендса. Были решены задачи разработки требований, предъявляемых к современному имитатору звездного неба; выполнена разработка структурной и функциональной схем стендса проверки параметров звездных датчиков, определен состав стендса и проведен анализ элементной базы с последующим выбором элементов для реализации стендса; разработана конструкция стендса, проведен расчет надежности, доказывающий соответствие конструкции условиям изоляции от внешних воздействий; разработан состав макета стендса.

Так в результате анализа элементной базы были выбраны: микрорадиодисплей для реализации излучающего элемента и звездный датчик. Коллиматорный блок было решено реализовать на основе объектива. При непосредственной реализации стендса были добавлены: ПК для обработки результатов отработки датчика, осциллограф для анализа процессов в камере датчика и мониторы для вывода полученного изображения.

Специфической особенностью разработки стендса отработок звездных датчиков ориентации и навигации КА является соединение в единой

конструкции весьма сложной оптико-механической части и не менее сложной электронной части. Если проследить тенденцию изменения соотношения этих двух частей, то можно заметить следующую закономерность. На начальном этапе разработок аналогичных стендов (1960-1970-е гг.) основная нагрузка по решению функциональных задач ложилась на оптико-механическую часть, электронные узлы выполняли вспомогательные функции, и их доля в общем балансе массы была невелика. В приборах 1980-х годов значительная доля функциональных задач решалась электроникой, соответственно возросла их доля в балансе массы примерно до половины. В современных астроприборах еще более возрастает количество функциональных задач, решаемых электроникой, но массовая доля электронных узлов снижается. Это вызвано происходящим в последние десятилетия прогрессом в микроэлектронике и вычислительной технике. Сегодня задачи, которые 20-30 лет назад были под силу только наземным ЭВМ, успешно решаются входящими в состав прибора микропроцессорами; одновременно снижается масса электроники несмотря на возросшее число решаемых задач и общее снижение массы приборов. В такой ситуации дальнейшее уменьшение массы должно происходить за счет упрощения оптико-механической части.

Сегодня одно из основных требований к приборам – требование работы на орбите в течение длительного времени – 10 лет и более. В связи с этим становятся весьма актуальными вопросы обеспечения устойчивости приборов к длительному воздействию факторов космического пространства.

В результате выполнения магистерской диссертации была реализована схема динамического стенда для отработки звездных датчиков – имитатора звездного неба. Стенд предполагается реализовывать в виде конструкции с неподвижным посадочным местом и с зеркально-сканирующей системой. Мобильность стенда обеспечена максимальным уменьшением габаритов

конструкции, использованием микроДисплея, персонального компьютера и переносного осциллографа.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БИС – большая интегральная схема;

БЦВК - бортовой цифровой вычислительный комплекс;

ВМ - вычислительная машина;

ЗД – звездный датчик;

ЗУ – запоминающее устройство (П – постоянное, О – оперативное);

ИИИ - имитатор источников излучения;

КА – космический аппарат;

КДС - комплекс динамических стендов;

КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник, технология построения полупроводниковых интегральных схем;

КМС - комплексный моделирующий стенд;

КПА - контрольно проверочная аппаратура;

КУИ - комплекс устройств имитации;

ЛВС - локальная вычислительная сеть;

ОЭП – оптико-электронный прибор;

ПЗС – прибор с зарядовой связью;

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;

ПО - программное обеспечение;

ПЭВМ - персональная электронно-вычислительная машина;

СБИС – сверхбольшая интегральная схема;

СОС - система ориентации и стабилизации;

ТМИ - телеметрическая информация;

ФПМ – фотоприемная матрица;

ФППЗ – фоточувствительный прибор с переносом заряда;

ФПУ – фотоприемное устройство.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Аванесов, Г. А. Звездные координаторы систем ориентации космических аппаратов / Г. А. Аванесов, С. В. Воронков, М. И. Куделин, А. А. Форш // Известия вузов. «Приборостроение». / Москва, 2003. - Т. 46, № 4. – С. 66–69.
- 2 Ален, К. У. Астрофизические величины : учебник / К. У. Ален. – Москва : Мир, 1977. - 446 с.
- 3 Волосов, Д. С. Фотографическая оптика : учебник / Д. С. Волосов. - Москва : Искусство, 1978. - 543 с.
- 4 Бакулин, П. И. Курс общей астрономии : учебник / П. И. Бакулин. – Москва : Наука, 1966. - 438 с.
- 5 Горошков, Б.И. Электронная техника : учебник / Б. И. Горшков. - Москва : Академия, 2005.
- 6 Дятлов, С.А. Обзор звездных датчиков ориентации космических аппаратов: учебник / С. А. Дятлов. - Москва : 2009. - 31 с.
- 7 Ежов, О. М. Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения звезд для приборов ориентации с матрицами ПЗС : оптический журнал / О. М. Ежов. – Москва : 1998. - с. 56–60.
- 8 Иванников, Я. М. Оптико-электронные приборы для ориентации и навигации космических аппаратов: учебное пособие / Я. М. Иванников. – Москва : Машиностроение, 1971. - 200 с.
- 9 Изнар, А. И. Оптико-электронные приборы космических аппаратов : науч. изд. / А. И. Изнар, А. В. Павлов, В. Ф. Федоров. – Москва : Машиностроение, 1972. - 368 с.
- 10 Колесов, М. П. Оптическая система с концентрическим объективом : оптический журнал / М. П. Колесов – Москва : Оптико-механическая промышленность, 1986. № 4. - с. 22-25.

- 11 Колосов, М. П. Оптическая система с пространственным шарниром : оптический журнал / М. П. Колосов – Москва : Оптико-механическая промышленность, 1986. № 6. - с. 13–16.
- 12 Колосов М. П. Оптическая система на основе коллиматора с кольцевым полем : оптический журнал / М. П. Колосов – Москва : Оптико-механическая промышленность, 1990. № 3. - с. 30–31.
- 13 Колосов, М. П. Анализ нерасстраиваемых оптических систем угломеров с неподвижной линией визирования : оптический журнал / М. П. Колосов, Ю. В. Лысюк. – Москва : Оптико-механическая промышленность 1998. № 8. - с. 61–65.
- 14 Поляков, К. П. Конструирование приборов и устройств радиоэлектронной аппаратуры : науч. изд. / К. П. Поляков. – Москва : Радио и связь, 1982. – 240 с.
- 15 Прохоров, М. Е. Современные датчики звездной ориентации : науч. изд. / М. Е. Поляков. - Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2009. - 186 с.
- 16 Федосеев, В. И. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учеб.пособие / В. И. Федосеев, М. П. Колосов. – Москва : Логос, 2007. - 248 с.
- 17 Федосеев, В. И. Анализ оптических сигналов матричными фотоприемниками : науч. изд. / В. И. Федосеев. – Москва : Известия вузов. Приборостроение. 1984. Т. 27. - с. 70–79.
- 18 Федосеев В. И., Карелин А.Ю., Короткова Е.Л. Калибровка угломерных оптических приборов КА по результатам измерений координат звезд : Оптический журнал. / В. И. Федосеев, А. Ю. Карелин, Е. Л. Короткова. - Москва : Известия вузов. 1995. № 9. - с. 26–31.;
- 19 Цицулин, А. К. Телевидение и космос: учеб.пособие. / А. К. Цицулин. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 238 с.

20 Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов : Учебник. / Ю. Г. Якушенков. - Москва : Логос, 2004. - 472 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт
Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

подпись В.Е. Косенко
инициалы, фамилия
«20 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МОБИЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ
ДИНАМИЧЕСКОГО СТЕНДА ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ОТРАБОТКИ ДАТЧИКОВ ЗВЕЗДНОЙ ОРИЕНТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

тема

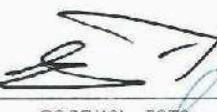
27.04.03 «Системный анализ и управление»

код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

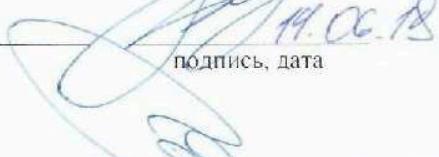

подпись, дата
14.06.18

профессор
МБК ЛФиКТ,
доктор техн. наук,
профессор
должность, ученая
степень

Е.Н. Головёнкин

инициалы, фамилия

Выпускник

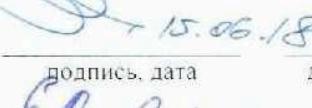

подпись, дата
14.06.18

инженер-
испытатель
АО «ИСС»
должность, ученая
степень

О.И. Марусов

инициалы, фамилия

Рецензент

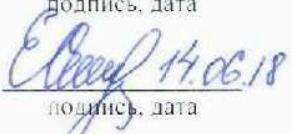

подпись, дата
15.06.18

должность, ученая
степень

А.И. Пилигрим

инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата
14.06.18

должность, ученая
степень

Е.С. Сидорова

инициалы, фамилия

Красноярск 2018