

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
Факультет электротехнический
Кафедра автоматики
Направление подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой

Голощапов С.С.

_____ 2021 г.

КАЛИБРОВКА МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА В СОСТАВЕ
ТРЕХОСНОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–27.03.04.2021.203.03.167ПЗ ВКР

Автор проекта
студент группы *МиЭт-426*

_____ / Литвинов Г.В.

подпись / ФИО

_____ 2021 г.

Руководитель работы

_____ д.т.н., профессор

должность

_____ / Белугин В.Б.

подпись / ФИО

_____ 2021 г.

Нормоконтроль

_____ старший преподаватель

должность

_____ / Елисеев В.П.

подпись / ФИО

_____ 2021 г.

АННОТАЦИЯ

Литвинов Г.В. Калибровка маятникового акселерометра в составе трехосного гиросtabilизатора. – Миасс: ЮУрГУ, ЭТФ; 2021, 91 с., 13 ил., библиографический список – 13 наименования.

В проекте приводится анализ существующей математической модели калибровки маятникового акселерометра и разработка модели на основе новых программных ресурсов, так же создана программа для выбора наилучшей системы ориентаций калибровки маятникового акселерометра и карданного подвеса. Приведен расчет калибровки, составлены наглядные графики работы системы и сравнение систем калибровок.

Одной из задач, которую предстоит решить в ходе работ, является разработка алгоритмического и программного обеспечения калибровки экспериментального ТГС на заводе-изготовителе и в условия предстартовой подготовки.

В качестве инструментального средства разработки алгоритмов калибровки и ПО используется математический пакет Matlab.

					270304.2021. 203.03.167 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Литвинов Г.В.			Калибровка маятникового акселерометра в составе трехосного гиросtabilизатора	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Белугин В.Б.				К	3	+
Н. Контр.		Елисеев В.П.				ЮУрГУ Кафедра автоматики		
Утв.		Голощапов						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ОБЗОРНЫЙ РАЗДЕЛ	8
1. Общие понятия об инерциальных навигационных системах	8
1.1 Некоторые сведения о навигации.....	8
1.2 Классификация навигационных систем.....	8
1.3 Принципы работы инерциальной навигации.....	10
2 Принцип действия, конструкция чувствительного элемента. Модель погрешности чувствительного элемента	14
2.1 Назначение и состав прибора	14
2.2 Описание чувствительного элемента	16
2.3 Принцип действия МА.....	20
2.4 Конструктивные параметры гиросtabilизатора	21
3 Используемая в настоящее время мат. модель МА	29
4. Существующие методы первичной обработки.....	31
4.1 Алгоритмы контроля и замеры аномальной информации с ДК, МА и учета погрешности ДК.....	31
4.2 Алгоритмы аппроксимации информации с ДК	33
4.3 Алгоритмы аппроксимации информации с МА	34
5 Используемые в настоящее время калибровка МА	37
5.1 Алгоритмы определения точностных параметров МА	37
5.2 Алгоритмы определения нулевых кодов КПУ	38
5.3 Алгоритмы определения углов отклонения корпуса прибора относительно горизонта.....	38
5.4 Рассчитать уточненные значения точностных параметров МА	38
5.5 Алгоритмы расчета углов неортогональности осей карданного подвеса СП	39
5.6 Алгоритмы расчета углов установки МА на СП	39
5.6.1 Рассчитать углы установки акселерометров $\delta_1(1)$, $\delta_2(1)$, $\delta_3(1)$ на СП по следующим формулам:	39
5.6.2 Рассчитать углы установки акселерометров $\delta_1(2)$, $\delta_2(2)$, $\delta_3(2)$ на СП по следующим формулам:	41
5.7 Уточнение параметров МА.....	41

6	Алгоритмы определения точностных параметров МА, нулевых кодов КПУ и углов неортогональности осей карданова подвеса СП.	42
6.1	При определении нулевых кодов КПУ прибор должен быть установлен на СНП. Погрешность выставки прибора в требуемое положение не должна превышать 10".	42
6.2	Входной информацией для данных алгоритмов являются:	42
6.3	Алгоритмы определения точностных параметров МА	46
6.4	Алгоритмы определения нулевых кодов КПУ	47
6.5	Алгоритмы определения углов отклонения корпуса прибора относительно горизонта.....	47
6.6	Алгоритмы расчета углов неортогональности осей карданова подвеса СП	48
6.7	Алгоритмы расчета углов установки МА на СП	48
7	Программное обеспечение.....	51
	ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ	53
8	Описание алгоритмов (блок схемы, алгоритмов калибровки, временная диаграмма).	53
8.1	Математическая модель МА.....	53
8.2	Математическая модель карданова подвеса.	53
8.3	Калибровка параметров МА.	54
8.4	Калибровка кардана.	55
8.5	Выбор системы ориентаций для калибровки МА и кардана.	56
9	Интерфейс программы.....	59
10	Получение оценки параметров МА и кардана.....	62
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
	Приложение А	68
	Приложение Б.....	75
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	91

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач, которую предстоит решить в ходе ВКР, является разработка алгоритмического и программного обеспечения калибровки ТГС на заводе-изготовителе и в условия предстартовой подготовки.

Таким образом, формируется цель выпускной квалификационной работы разработать новые алгоритмы калибровки маятниковых акселерометров в составе ГС и кардана, проверить их на штатном ТГС с возможностью их использования для перспективного ЧГС.

Целью калибровки является:

- подтверждение соответствия ТГС требованиям ТЗ по допускам на точностные параметры;
- обеспечение точности определения навигационных параметров изделия при помощи автономной навигационной системы (ИНС), основным измерительным элементом которой является ГС. Точность работы ИНС во многом определяется корректировкой показаний первичных элементов измерения инерциальных параметров движения, установленных на стабилизированной платформе ГС, а именно трех маятниковых акселерометров (МА), измеряющих приращение кажущейся скорости по осям платформы.

Алгоритмическое и программное обеспечение используемое НПОЭ для калибровки их основного изделия – трёхосного гиросtabilизатора (ТГС), было разработано в 60-70 годах прошлого века. За прошедшее время в области вычислительной техники, ПО и алгоритматике произошли кардинальные изменения. Старая методика калибровки была разработана вручную без учета всех этих революционных изменений. Полученные ими в то время алгоритмы и формулы, которые мало кто сможет переделать под новый продукт. На НПОЭ возникают большие трудности при переносе старой методики на новые модификации ТГС, а перенос ее на ЧГС является еще сложнее.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

С учетом этого требуется разработать новую методику калибровки ГС с учетом возможностей современной вычислительной техники, математического и программного обеспечения. Это позволит автоматизировать процесс разработки алгоритмов калибровки и соответствующего ПО, сделает их легко масштабируемыми и легко переносимыми на новые типы приборов или на модификации уже существующих. В данной работе представлена новая методика калибровки ЧЭ в составе ТГС и проведено ее сравнение с штатной методикой, используемой в настоящее время. Но основной целью является перенос новых подходов в калибровке на новый перспективный ЧГС. Универсальность и полная автоматизация разработки новой методики позволит сделать это в дальнейшем без большого труда.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

ОБЗОРНЫЙ РАЗДЕЛ

1. Общие понятия об инерциальных навигационных системах

1.1 Некоторые сведения о навигации

Слово «Навигация» происходит от латинского слова «*navigatio*», что в переводе значит мореплавание. В наши дни под навигацией понимают теоретические и практические навыки вождения по определенному маршруты таких подвижных объектов, как самолеты, ракеты, космические аппараты и т.д. Под навигацией в узком смысле слова понимается решение навигационной задачи, которая состоит в определении текущих координат некоторого объекта и составляющих вектора его скорости. Под навигацией в широком смысле слова понимают решение навигационной задачи и использование полученной информации для управления центром масс объекта.

1.2 Классификация навигационных систем

По измеряемой величине навигационные устройства классифицируются на измерители координат места, скорости полета, курсового угла и т.д.

В зависимости от дальности полета различают ближнюю навигацию, обеспечивающую полеты в районе аэродрома и посадку летательного аппарата на землю, дальнюю навигацию, применяемую при полетах на маршрутах значительной протяженности и охватывающих практически всю поверхность земного шара, и космическую навигацию, используемую при полетах космических летательных аппаратов вокруг Земли и в межпланетном пространстве.

В зависимости от того какими средствами и откуда получается навигационная информация, все навигационные системы можно разделить на два вида: автономные и неавтономные.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Автономные навигационные системы располагаются на летательном аппарате, и их работа не зависит от работы наземных радиотехнических средств, поэтому они свободны от влияния внешних воздействий. Недостаток автономных систем в том, что они накапливают свои инструментальные ошибки пропорционально времени работы. В неавтономных навигационных системах часть средств также располагается на летательном аппарате, но навигационная информация получается от наземных радиотехнических и других средств. В отличие от автономных, неавтономные системы более простые, но менее помехоустойчивые (к примеру магнитные системы подвержены воздействию магнитных предметов, которые находятся рядом), так как требуют внешних ориентиров для управления подвижным объектом.

Навигационные устройства могут работать в индикаторном режиме, когда получаемая от них информация используется только для общей навигационной ориентировки, и в режиме управления, когда информация используется оператором для управления летательным аппаратом вручную или сообщается системе автоматического управления. По мере увеличения дальности полета возрастает роль автономных навигационных устройств.

Параметры, определяющие движение центра масс летательного аппарата, измеряются относительно какой-либо системы координат, принятой за начало отсчета. Для удобства пользования навигационные системы координат связывают с какими-либо телами, траекториями движения тел или полями различной физической природы. Все эти системы координат можно разделить на две группы: неинерциальные и инерциальные. Неинерциальная система координат – система координат, в которой наблюдается ускорение движения тел при отсутствии действия на них сил со стороны других тел.

Инерциальная система координат, напротив характеризуется поступательным, равномерным и прямолинейным движением тел, при отсутствии действия внешних сил.

1.3 Принципы работы инерциальной навигации

Инерциальная навигация основана на законах Ньютона. Первый закон Ньютона гласит: "Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока воздействие со стороны некоторой внешней силы не заставит его изменить это состояние". Зная начальное условие, то есть начальное положение объекта, его курс и скорость, можно легко определить текущее положение движущегося объекта в зависимости от времени.

Определить начальное состояние тела, т.е. выяснить, находится оно в движении или в состоянии покоя, можно в зависимости от системы координат, в которой рассматривается динамика тела. В качестве неподвижной системы координат часто принимается система, оси которой связаны с определенными звездами. Во многих случаях неподвижной системой координат считается система, связанная с поверхностью Земли. Однако пренебрежение вращением Земли приводит к неправильным результатам при навигации на большие расстояния.

Второй закон Ньютона гласит: "Если на тело действует сила, то произведение ускорения a , приобретаемого телом, и массы m тела пропорционально действующей силе F ".

Закон выражается уравнением (1).

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1.1)$$

Ускорение и равнодействующая приложенных сил всегда направлены в одну и ту же сторону.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

В соответствии со вторым законом Ньютона информацию о координатах тела можно получить, измерив внешние силы, приложенные к телу. Однако измерить приложенные к объекту внешние силы весьма сложно. Поэтому целесообразно измерять не приложенные к объекту силы, а ускорения. Для измерения величины ускорения, используются акселерометры. Показания акселерометра при произвольной ориентации его оси чувствительности определяются вектором кажущегося ускорения, (формула 2).

$$\vec{a}^k = \vec{a} - \vec{g}(\vec{R}), \quad (1.2)$$

где \vec{a}^k – вектор кажущегося ускорения; \vec{a} – вектор абсолютного ускорения (ускорения вызываемые активными силами); $\vec{g}(\vec{R})$ – вектор напряженности поля тяготения Земли (составляющие гравитационных ускорений). Инерциальные системы навигации по методу определения места относятся к системам счисления пути. Счисление пути и скорости летательного аппарата осуществляется интегрированием по времени соответствующих дифференциальных уравнений, в правых частях которых находятся измеренные по направлению осей чувствительности ускорения, измеряемые акселерометрами, ориентированными относительно некоторой инерциальной системы координат. Для нахождения пути, пройденного носителем от точки старта, ускорение дважды интегрируется. Для нахождения скорости ускорение интегрируется один раз.

Расстояние, скорость и ускорение связаны между собой формулой 3

$$x = \int v dt = \iint a dt^2, \quad (1.3)$$

где x-расстояние, пройденное объектом; v-скорость объекта; a-ускорение.

Применив формулу 3 к формуле 1, можно записать второй закон Ньютона в виде формул 4-6.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист 11

$$m\ddot{x} = F_x \quad (1.4)$$

$$m\ddot{y} = F_y \quad (1.5)$$

$$m\ddot{z} = F_z \quad (1.6)$$

где m - масса подвижного объекта; F -сила приложенная к объекту; \ddot{x} \ddot{y} , \ddot{z} – кажущиеся ускорения (вторая производная по времени от перемещения тела).

Поскольку измеряемыми параметрами являются только ускорения движения летательного аппарата, вызванные действием на него внешних сил, то все возмущения и сигналы другой природы, например, радиоизлучения, световые излучения, магнитные поля и т.п., не воспринимаются инерциальной системой навигации. Благодаря этому обеспечивается практически абсолютная автономная навигация летательных аппаратов.

Вращающиеся роторы являются чувствительными элементами гироскопов. Они воспринимают малые угловые отклонения и вырабатывают сигналы, пропорциональные этим отклонениям. Данные сигналы, обычно в цифровом коде, преобразуются в цифровых вычислительных устройствах к удобному виду или используются как сигналы управления объектом.

Если система инерциальной навигации используется совместно с автопилотом, она обычно работает как регулятор, удерживающий движущийся объект на некотором определенном курсе. Если же система работает как независимое устройство, то она следит за произвольным перемещением объекта и определяет параметры его движения, на основании которых оператор (система управления) осуществляет управление летательным аппаратом для установления необходимого курса и достижения требуемого места назначения.

Из положительных качеств инерциальных систем навигации, в условиях высоких скоростей и высот полета особенно ценны такие как автономность,

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

возможность работы при больших скоростях и ускорениях, высокая точность и большой объем навигационной информации.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

2 Принцип действия, конструкция чувствительного элемента.

Модель погрешности чувствительного элемента

2.1 Назначение и состав прибора

Прибор представляет собой гиросtabilизатор индикаторного типа, ГСП которого размещена в трехосном кардановом подвесе и предназначен для реализации инерциальной системы координат в составе прибора. Кинематическая схема прибора приведена на рисунке 2.1.

На ГСП прибора установлены:

- два чувствительных элемента системы стабилизации ТГС – динамически настраиваемые гироскопы ДНГ1, ДНГ2;
- три измерителя приращения кажущейся линейной скорости – маятниковые акселерометры МАх, МАу, МАz, измерительные оси которых параллельны соответствующим осям СП (ОХП, ОУП, ОZП).

По осям карданова подвеса установлены двигатели стабилизации – бесконтактные двигатели постоянного тока ДС-В, ДС-Р, ДС-Т и датчики угла – двухотсчетные синусно-косинусные поворотные трансформаторы ДК-В, ДК-Р, ДК-Т.

Для уменьшения влияния ударных и вибрационных воздействий на чувствительные элементы ГСП между корпусом прибора и наружной рамой карданова подвеса установлены резинометаллические амортизаторы.

По осям Т и Р карданова подвеса прибора установлены резинометаллические упоры, ограничивающие углы про качки подвижной части прибора вокруг осей Т, Р.

По оси В установлены два коллекторных токоподвода, обеспечивающие неограниченный угол поворота ГСП вокруг оси В.

В исходном положении карданова подвеса оси Р, В, Т с точностью до углов неортогональности совпадают с осями ОХК, ОУК и ОZК, связанными с корпусом прибора, и с осями ОХП, ОУП, ОZП, связанными с ГСП.

											Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР						14

2.2 Описание чувствительного элемента

Конструкция входящего прибора представлена на рисунках

Инерционной массой (маятником) прибора является закрепленный в упругом подвесе каркас поз.19.

Упругий подвес состоит из двух упругих цилиндрических стержней поз.11, закрепленных в основании поз.10 и опоре поз.12.

Основание подвеса с помощью винтов закреплено на корпусе поз.1, а в опору подвеса вклеена инерционная масса - каркас поз.19. Стержни изолированы от основания, опоры и используются в качестве токоподводов. Магнитоэлектрический датчик силы состоит из обмотки поз.20, расположенной на каркасе поз.19, и магнитов поз.18.

Емкостной датчик угла состоит из подвижной, двух неподвижных обкладок и трансформатора. Подвижной обкладкой является внутренняя поверхность Д каркаса поз.19, а неподвижными обкладками являются металлизированные поверхности на керамической плате поз.21. Плата закреплена в корпусе поз.1. Рабочий зазор между обкладками емкостного датчика составляет 0,036 – 0,043 мм.

Каркас (маятник), датчик силы МДС, упругий подвес, емкостный датчик угла размещены в герметичной полости Ж, которая заполняется жидкостью ПМС-20.

На корпусе поз.1 предусмотрено отверстие, которое после обезгаживания и заполнения жидкостью герметизируется винтом поз.26.

Сильфон поз.15 изолирован от внешней среды с изменяющимся давлением герметизацией полости Е.

Кроме того, на корпусе поз.1 установлены на клей:

- трансформатор поз.3, включенный в мост емкостного датчика угла;
- терморезистор поз.23, используемый для компенсации температурной погрешности;
- резистор поз.4, используемый для снятия заряда с подвижной обкладки емкостного датчика угла.

											Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР						16

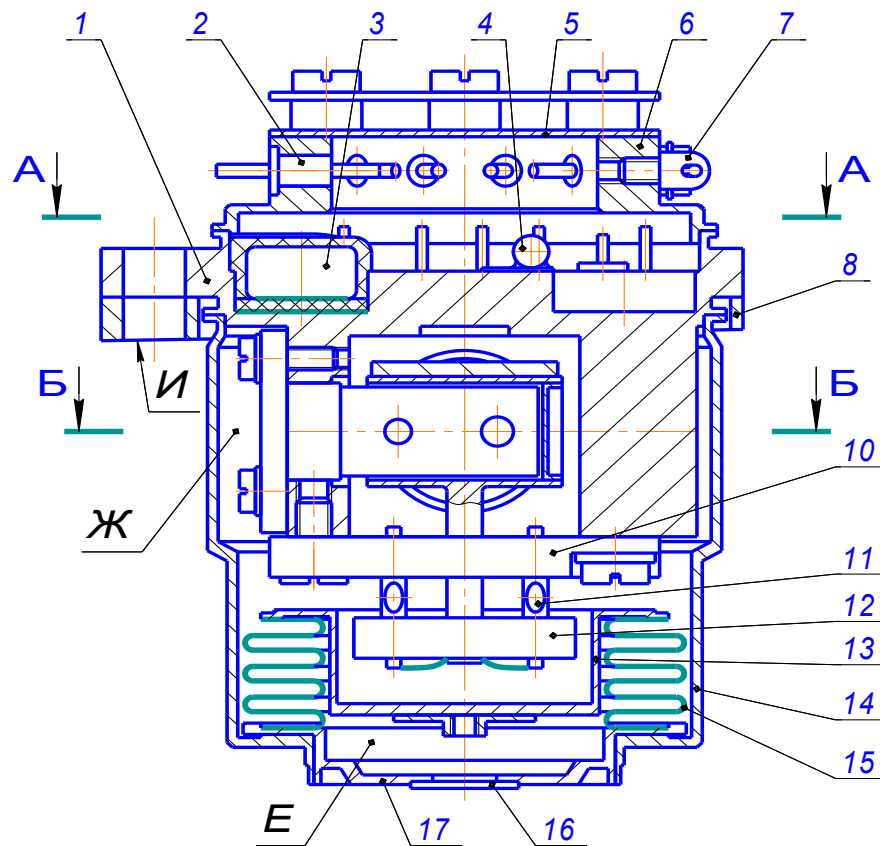
Все основные элементы конструкции прибора: корпуса поз.1 и поз. 6, каркас-маятник, опора и основание подвеса, колпак, кольцо сильфона выполнены из немагнитного и легкого титанового сплава BT5-1.

Корпуса поз.1 и поз.6 соединены между собой лазерной сваркой. В корпусе поз.6 установлены на клей выводы поз.2 для монтажа прибора в изделии и лепесток заземления поз.7. Корпус поз.6 закрыт заглушкой поз.5, закрепленной винтами.

Габариты прибора: высота 42,41 мм max, диаметр фланца корпуса \varnothing 41 мм.

Масса прибора составляет не более 75 г.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17



- | | | |
|-------------------|------------------|--------------------|
| 1 - Корпус | 10 - Основание | 19 - Каркас |
| 2 - Вывод | 11 - Стержень | 20 - Обмотка |
| 3 - Трансформатор | 12 - Опора | 21 - Плата |
| 4 - Резистор | 13 - Дно сиффона | 22 - Упор |
| 5 - Заглушка | 14 - Колпак | 23 - Терморезистор |
| 6 - Корпус | 15 - Сильфон | 24 - Прокладка |
| 7 - Лепесток | 16 - Заглушка | 25 - Заглушка |
| 8 - Прокладка | 17 - Кольцо | 26 - Винт |
| | 18 - Магнит | |

Рисунок 2.2 МА в разрезе

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

18

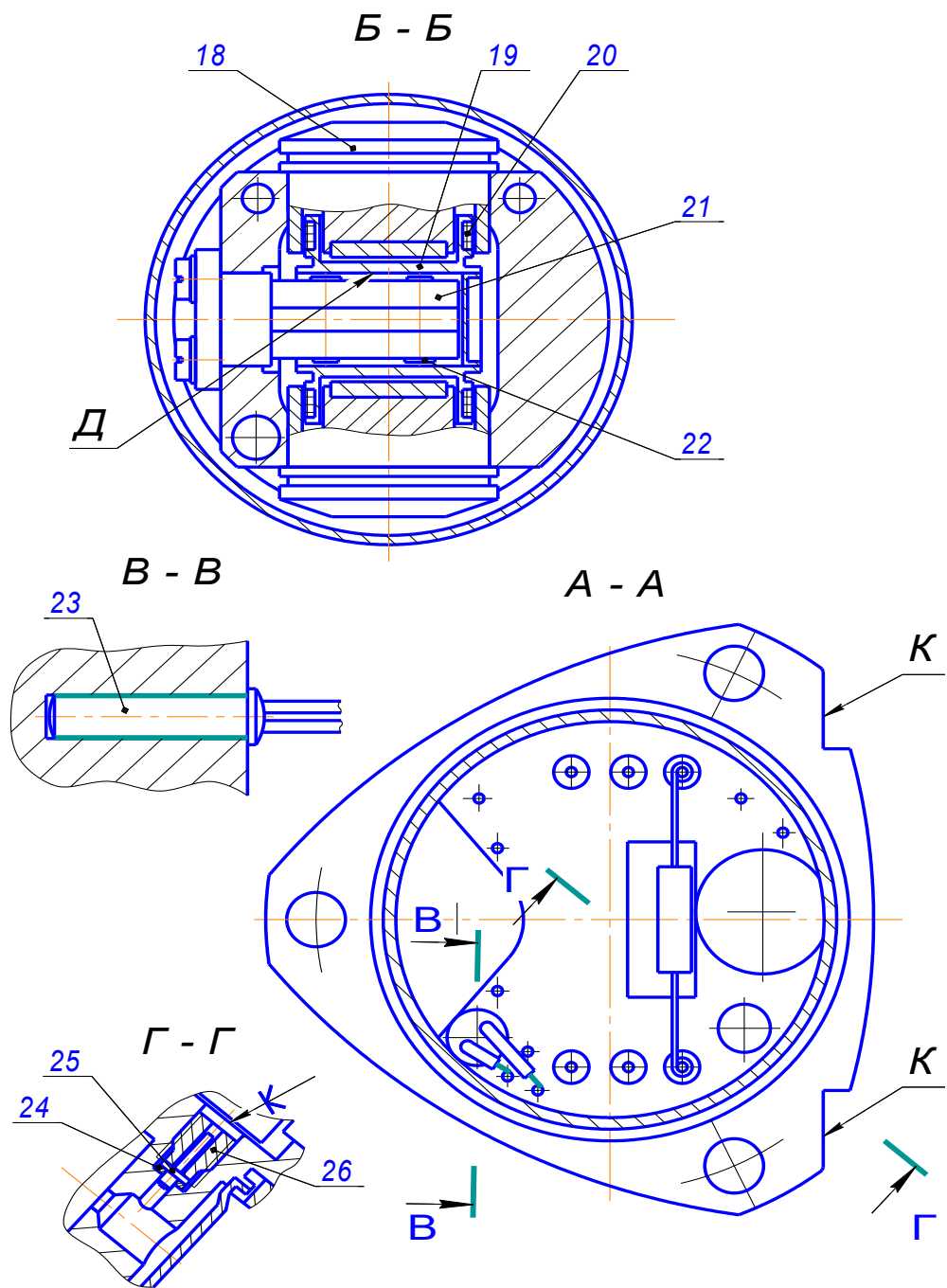


Рисунок 2.3. МА в разрезе сверху

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

19

2.3 Принцип действия МА

Более распространены в настоящее время маятниковые акселерометры, обладающие возможностями достижения меньшего трения в подвесе при меньших габаритных размерах. Маятниковые акселерометры измеряют ускорения по углу отклонения маятника, удерживаемого в заданном положении пружиной.

Маятниковый акселерометр - устройство с обратной связью. Датчик момента действует от сигнала с датчика угла, усиленного усилителем, и любое малое отклонение маятника от его нулевого положения немедленно преобразуется в момент, с тем, чтобы восстановить нулевое положение маятника. Момент, необходимый для удержания маятника в неизменном положении относительно корпуса, пропорционален составляющей кажущегося ускорения, которая действует в направлении, перпендикулярном как оси равновесия маятника, так и оси вращения. Выходом акселерометра является сигнал, подаваемый на датчик момента.

Пример маятникового акселерометра приведен на рисунке 2.4.

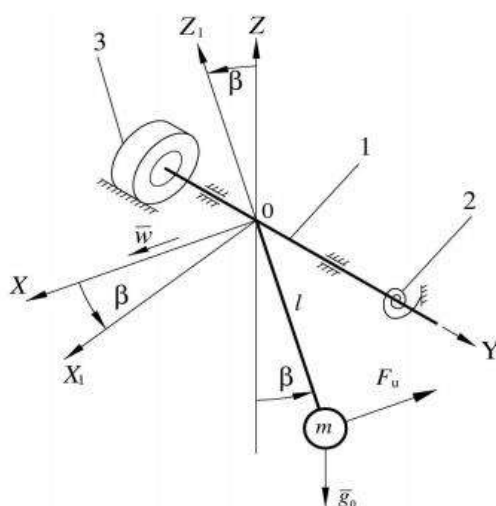


Рисунок. 2.4– Принципиальная схема маятникового акселерометра

Здесь инерционная масса m смещена на плече l от оси подвеса 1. При наличии ускорения w вдоль оси OX , инерционная масса повернется на угол β до тех пор, пока составляющая силы тяжести $mg\sin\beta$ и реакция $c\beta$ пружины 2 не уравновесят момент силы инерции $mlw\cos\beta$. Угол поворота β снимается преобразователем угла 3.

2.4 Конструктивные параметры гиросtabilизатора

Кинематическая схема гиросtabilизатора приведена на рисунке 2.1. Стрелками на рисунке 2.1 показаны положения осей чувствительности ДНГ и МА относительно осей подвеса.

Свяжем с ГСП ортогональную систему координат $OX_{II}Y_{II}Z_{II}$ (базовая система координат), образованную пересечением трех базовых плоскостей:

- базовая плоскость 1 (БП1) – содержит в себе ось чувствительности акселерометра МАХ и параллельна оси чувствительности акселерометра МАZ;
- базовая плоскость 2 (БП2) – содержит в себе ось чувствительности акселерометра МАХ и перпендикулярна БП1;
- базовая плоскость 3 (БП3) – проходит через геометрический центр подвеса СП и перпендикулярна БП1 и БП2.

С осями чувствительности акселерометров МАХ, МАУ, МАZ свяжем неортогональную систему координат $O\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$. Взаимное расположение систем $OX_{II}Y_{II}Z_{II}$ и $O\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ приведено на рисунке 2.5.

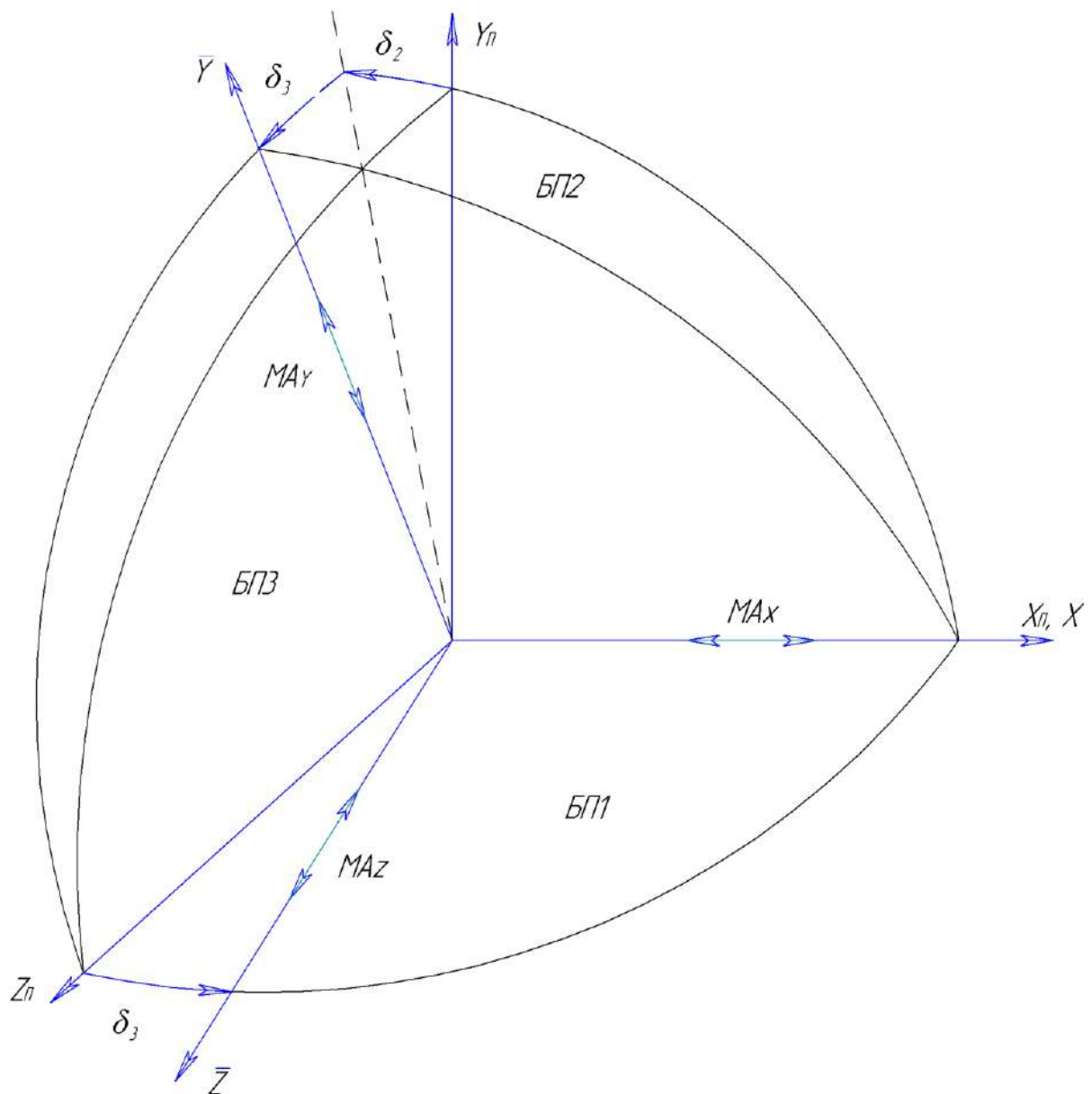


Рисунок 2.5

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ - углы установки маятниковых акселерометров в базовой системе координат $OX_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}$.

Углы $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ имеют положительный знак при повороте оси чувствительности МА против часовой стрелки, если смотреть со стороны положительного направления соответствующих осей системы координат.

Связь между системами координат $OX_{\Pi} Y_{\Pi} Z_{\Pi}$ и $O\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ определяется следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} &= M \cdot \begin{pmatrix} X_{\Pi} \\ Y_{\Pi} \\ Z_{\Pi} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} X_{\Pi} \\ Y_{\Pi} \\ Z_{\Pi} \end{pmatrix} &= M^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} M &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\sin \delta_2 \cos \delta_3 & \cos \delta_2 \cos \delta_3 & \sin \delta_3 \cos \delta_2 \\ \sin \delta_1 & 0 & \cos \delta_1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\delta_2 & 1 & \delta_3 \\ \delta_1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ M^{-1} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \operatorname{tg} \delta_2 + \operatorname{tg} \delta_1 \operatorname{tg} \delta_3 & \frac{1}{\cos \delta_2 \cos \delta_3} & -\frac{\operatorname{tg} \delta_3}{\cos \delta_1} \\ -\operatorname{tg} \delta_1 & 0 & \frac{1}{\cos \delta_1} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \delta_2 & 1 & -\delta_3 \\ -\delta_1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Свяжем с осью В ортогональную систему координат $OX_{ВП}Y_{ВП}Z_{ВП}$, ось $OY_{ВП}$, которой направлена по оси В, оси $OX_{ВП}$ и $OZ_{ВП}$ с точностью до углов неортогональности оси В совпадают с осями OX_{Π} , OZ_{Π} .

Свяжем с внутренней рамкой систему координат $OX_{В}Y_{В}Z_{В}$. Взаимное расположение систем координат $OX_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$, $OX_{ВП}Y_{ВП}Z_{ВП}$ и $OX_{В}Y_{В}Z_{В}$ приведено на рисунке 2.6.

где: $\varepsilon_{ВХ}, \varepsilon_{ВZ}$ - углы неортогональности оси В относительно системы координат $OX_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$;

$\psi_n, \dot{\psi}_n$ - угол и угловая скорость относительного поворота СП и внутренней рамы карданова подвеса.

Углы $\varepsilon_{ВХ}, \varepsilon_{ВZ}$ имеют положительный знак, когда ось В развернута против часовой стрелки относительно соответствующих осей системы координат $OX_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$.

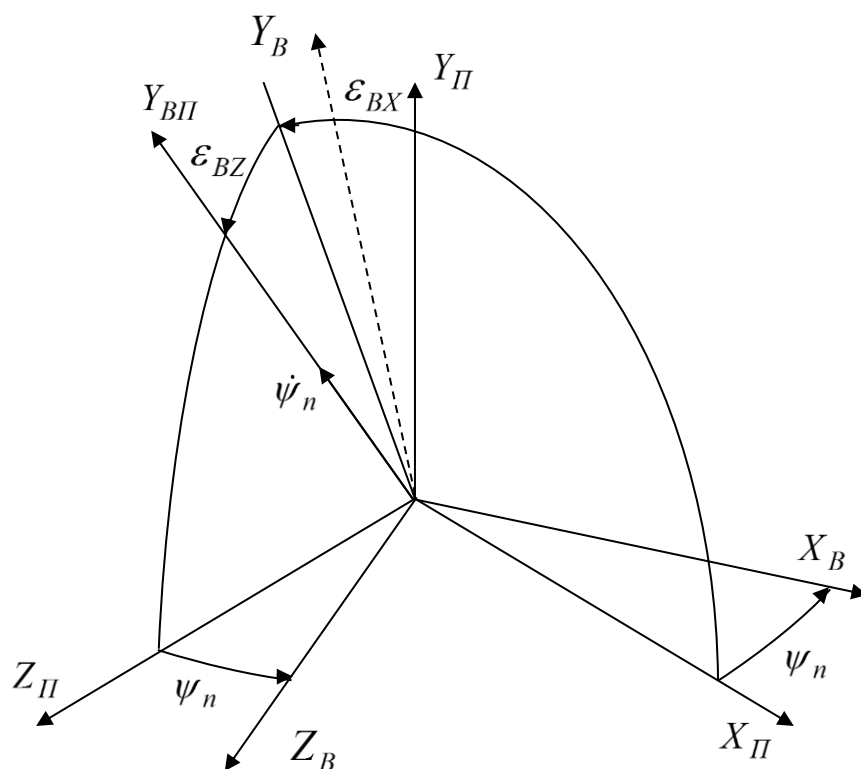


Рисунок 2.6

Связь между системами координат $O X_{\text{ВП}} Y_{\text{ВП}} Z_{\text{ВП}}$ и $O X_{\text{П}} Y_{\text{П}} Z_{\text{П}}$ с точностью до малых второго порядка дается следующей матрицей:

$$\begin{pmatrix} X_{\text{ВП}} \\ Y_{\text{ВП}} \\ Z_{\text{ВП}} \end{pmatrix} = A_B \cdot \begin{pmatrix} X_{\text{П}} \\ Y_{\text{П}} \\ Z_{\text{П}} \end{pmatrix} \quad A_B = \begin{pmatrix} 1 & \epsilon_{\text{BX}} & 0 \\ -\epsilon_{\text{BX}} & 1 & \epsilon_{\text{BZ}} \\ 0 & \epsilon_{\text{BZ}} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Свяжем с осью Р ортогональную систему координат $O X_{\text{РП}} Y_{\text{РП}} Z_{\text{РП}}$, ось $O X_{\text{РП}}$ которой направлена по оси Р, а оси $O Y_{\text{РП}}$ и $O Z_{\text{РП}}$ с точностью до углов неортогональности оси Р совпадают с осями $O Y_{\text{В}}$ и $O Z_{\text{В}}$. Свяжем с наружной рамкой систему координат $O X_{\text{Н}} Y_{\text{Н}} Z_{\text{Н}}$. Взаимное расположение систем координат $O X_{\text{Н}} Y_{\text{Н}} Z_{\text{Н}}$, $O X_{\text{РП}} Y_{\text{РП}} Z_{\text{РП}}$ и $O X_{\text{В}} Y_{\text{В}} Z_{\text{В}}$ приведено на рисунке 2.7.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

24

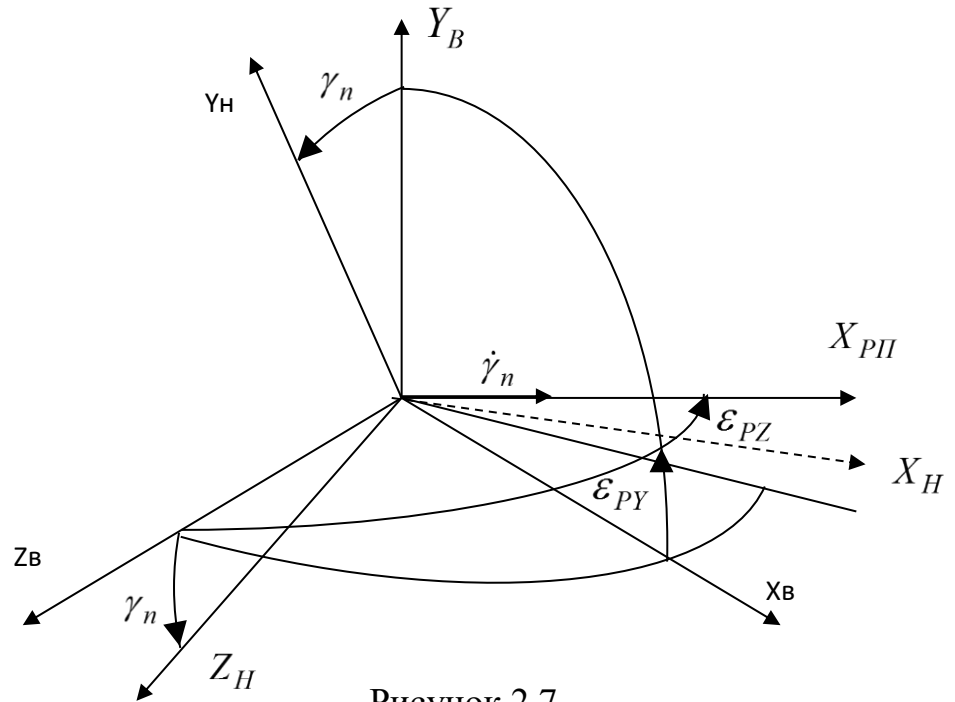


Рисунок 2.7

где: $\epsilon_{PY}, \epsilon_{PZ}$ - углы неортогональности оси P относительно системы координат $OX_B Y_B Z_B$;

$\gamma_n, \dot{\gamma}_n$ - угол и угловая скорость относительного поворота внутренней и наружной рам карданова подвеса.

Углы $\epsilon_{PY}, \epsilon_{PZ}$ имеют положительный знак, когда ось P развернута против часовой стрелки относительно соответствующих осей системы координат $OX_B Y_B Z_B$.

Связь между системами координат $OX_{P\Pi} Y_{P\Pi} Z_{P\Pi}$ и $OX_B Y_B Z_B$ с точность до малых второго порядка дается следующей матрицей:

$$\begin{pmatrix} X_{P\Pi} \\ Y_{P\Pi} \\ Z_{P\Pi} \end{pmatrix} = A_P \cdot \begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix} \quad A_P = \begin{pmatrix} 1 & \epsilon_{PY} & -\epsilon_{PZ} \\ -\epsilon_{PY} & 1 & 0 \\ \epsilon_{PZ} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Свяжем с осью Т ортогональную систему координат $OX_{ТП}Y_{ТП}Z_{ТП}$, ось $OZ_{ТП}$ которой направлена по оси Т, а оси $OX_{ТП}$ и $OY_{ТП}$ с точностью до углов неортогональности оси Т совпадают с осями OX_H и OY_H . Свяжем с корпусом прибора систему координат $OX_KY_KZ_K$. Взаимное расположение систем координат $OX_HY_HZ_H$, $OX_{ТП}Y_{ТП}Z_{ТП}$ и $OX_KY_KZ_K$ приведено на рисунке 2.8.

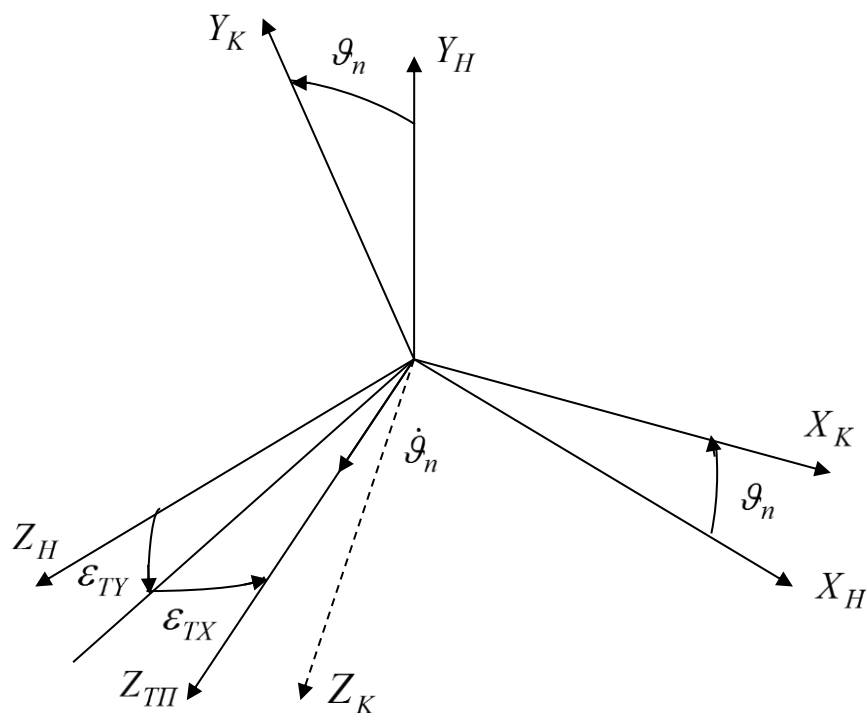


Рисунок 2.8

где: $\epsilon_{TX}, \epsilon_{TY}$ - углы неортогональности оси Т относительно системы координат $OX_H Y_H Z_H$;

$\theta_n, \dot{\theta}_n$ - угол и угловая скорость относительного поворота наружной рамы карданова подвеса и корпуса ГС.

Углы $\epsilon_{TX}, \epsilon_{TY}$ имеют положительный знак, когда ось Т развернута против часовой стрелки относительно соответствующих осей системы координат $OX_H Y_H Z_H$.

Связь между системами координат $OX_{ТП}Y_{ТП}Z_{ТП}$ и $OX_H Y_H Z_H$ с точность до малых второго порядка определяется следующей матрицей:

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

единицы младшего разряда 10-6 рад и гарантируются на весь срок эксплуатации.

Величина систематических значений углов неортогональности не превосходит по абсолютной величине 30 угл. мин.

Случайные составляющие этих углов характеризуют стабильность сохранения систематических значений за весь период эксплуатации и хранения и по абсолютной величине не превосходят 40 угл. сек.

Здесь и далее максимальные значения случайных составляющих погрешностей точностных параметров даются на уровне трех среднеквадратичных отклонений (3σ).

Систематические значения углов установки МА δ_i определяются и паспортизируются при изготовлении прибора с ценой единицы младшего разряда 10-6 рад, гарантируются на межрегламентный период, равный трем годам, и подлежат уточнению один раз в три года.

Систематические значения углов установки МА не превосходят по абсолютной величине 30 угл. мин. Случайные составляющие этих углов характеризуют стабильность сохранения систематических значений за межрегламентный период, контролируются при уточнении систематических значений и по абсолютной величине не превосходят 20 угл. сек.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

3 Используемая в настоящее время мат. модель МА

Выходной сигнал МА ΔQ_K ($K = X, Y, Z$) можно представить в виде следующего выражения:

$$\Delta Q_K = \text{entier} \left\{ \frac{1}{C_K} \int_{t-\tau}^t (\dot{W}_K + \tau_{0K}) dt \right\} \quad (3.1)$$

где : $K = X, Y, Z$;

ΔQ_K - выходной сигнал k-го МА;

C_K - масштабный коэффициент k-го МА;

τ_{0K} - нулевой сигнал k-го МА;

\dot{W}_K - проекция кажущегося ускорения на ось чувствительности k-го МА;

τ - длительность измерения приращения кажущейся скорости (время между приходом предыдущей и текущей командой на перезапись буферных регистров МА);

t - текущее время;

entier - оператор целой части.

Величина ΔQ_K выдается 16-разрядным дополнительным двоичным кодом.

Величина ΔQ_K имеет положительный знак, если проекция кажущегося ускорения объекта на ось k положительна (на неподвижном основании ΔQ_K имеет положительный знак, если проекция ускорения силы тяжести на ось k отрицательна).

Масштабный коэффициент k-го МА представляется в следующем виде:

$$C_K = C_H(1 + \rho_K), \quad (3.2)$$

где: C_H - номинальное значение масштабного коэффициента k-го МА, равного 0,0008 м/с;

ρ_K - относительная погрешность масштабного коэффициента k-го МА.

$$\rho_K = \frac{C_K - C_H}{C_H}. \quad (3.3)$$

Систематические значения относительной погрешности масштабных коэффициентов МА ρ_K определяются и паспортизируются при изготовлении

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

прибора с ценой единицы младшего разряда 10-7, гарантируются на межрегламентный период, равный трем годам, и подлежат уточнению один раз в три года.

Систематические значения ρ_K не превосходят по абсолютной величине 0,3 %. Случайные составляющие относительной погрешности масштабных коэффициентов характеризуют стабильность сохранения систематических значений за межрегламентный период, контролируются при уточнении систематических значений и по абсолютной величине не превосходят 0,01 % для МАу и

0,02 % для МАх и МАz.

Систематические значения нулевых сигналов МА τ_{0K} определяются и паспортизируются при изготовлении прибора с ценой единицы младшего разряда 10-6 м/с², гарантируются на межрегламентный период, равный трем годам, и подлежат уточнению один раз в три года.

Систематические значения τ_{0K} не превосходят по абсолютной величине 0,01 м/с². Случайные составляющие нулевых сигналов характеризуют стабильность сохранения систематических значений за межрегламентный период, контролируются при уточнении систематических значений и по абсолютной величине не превосходят 0,001 м/с².

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

4. Существующие методы первичной обработки.

4.1 Алгоритмы контроля и замеры аномальной информации с ДК, МА и учета погрешности ДК

В режиме удержания для каждой серии произвести следующие вычисления:

$$N_{v\text{ ср}}^j = \text{med}(\bar{N}_v^j), \quad (4.1)$$

$$N_v^j(i) = \begin{cases} \bar{N}_v^j(i), & \text{если } |\bar{N}_v^j(i) - N_{v\text{ ср}}^j| \leq \Delta \\ N_{v\text{ ср}}^j, & \text{если } |\bar{N}_v^j(i) - N_{v\text{ ср}}^j| > \Delta \end{cases}, \quad (4.2)$$
$$i = 1, \dots, n.$$

В нормальных условиях:

$\Delta = 2560$ – для ДК;

$\Delta = 5$ – для МА.

При климатических испытаниях:

$\Delta = 5120$ – для ДК;

$\Delta = 7$ – для МА.

Здесь:

$\bar{N}_v^j(i)$ – фиксируемая информация с ДК и МА;

$N_v^j(i)$ – информация с ДК и МА после замены аномальных точек;

med – медиана (срединное значение);

$v = T, P, B, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ – индекс источника информации ДКТ, ДКР, ДКВ, МАХ, МАУ, MAZ;

j – номер серии;

i – номер опроса в серии.

В режиме стабилизации для МА и режиме стабилизации и управления для ДК произвести следующие вычисления:

$$\Delta \bar{N}_v^j(i) = \bar{N}_v^j(i) - \bar{N}_v^j(i-1), \quad i = 2, \dots, n, \quad (4.3)$$

$$m_v^j(i) = \begin{cases} 1, & \text{если } |\Delta \bar{N}_v^j(i)| \leq \Delta \\ 0, & \text{если } |\Delta \bar{N}_v^j(i)| > \Delta \end{cases}, \quad (4.4)$$

$$\Delta \bar{N}_v^j(i) = \frac{\sum_{i=2}^n m_v^j(i) \Delta \bar{N}_v^j(i)}{\sum_{i=2}^n m_v^j(i)}, \quad (4.5)$$

$$N_v^j(1) = \begin{cases} \bar{N}_v^j(1), & \text{если } |\Delta \bar{N}_v^j(2)| > \Delta \text{ и } |\Delta \bar{N}_v^j(3)| > \Delta \text{ или } |\Delta \bar{N}_v^j(2)| \leq \Delta \\ \bar{N}_v^j(2) - \Delta \bar{N}_v^j(i), & \text{если } |\Delta \bar{N}_v^j(2)| > \Delta \text{ и } |\Delta \bar{N}_v^j(3)| \leq \Delta \end{cases}, \quad (3.6)$$

$$\Delta N_v^j(i) = \bar{N}_v^j(i) - N_v^j(i-1), \quad i = 2, \dots, n, \quad (4.7)$$

$$N_v^j(i) = \begin{cases} \bar{N}_v^j(i), & \text{если } |\Delta N_v^j(i)| \leq \Delta \\ N_v^j(i-1) + \Delta \bar{N}_v^j(i), & \text{если } |\Delta N_v^j(i)| > \Delta \end{cases}. \quad (4.8)$$

В нормальных условиях:

$\Delta = 2560$ – для ДК в режиме стабилизации (инерциальный);

$\Delta = 5120$ – для ДК в режиме управления (ТП заданными уровнями);

$\Delta = 5$ – для МА.

При климатических испытаниях:

$\Delta = 5120$ – для ДК;

$\Delta = 7$ – для МА.

В режиме стабилизации и управления при необходимости учета погрешности ДК после замены аномальных точек выполнить следующие вычисления:

$$\tilde{N}_v^j(i) = N_v^j(i) - N_0^j, \quad (4.9)$$

$$\delta N_v^j(i) = \tilde{a}_v^l \cdot C \cdot \frac{h_1}{p_0}, \quad (4.10)$$

$$l = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{N}_v^j(i) \leq -257 \\ 2, & \text{если } \tilde{N}_v^j(i) = -256 \\ 3, & \text{если } -256 < \tilde{N}_v^j(i) < 0 \\ 4, & \text{если } 0 \leq \tilde{N}_v^j(i) < 256 \\ 5, & \text{если } \tilde{N}_v^j(i) = 256 \\ 6, & \text{если } \tilde{N}_v^j(i) > 257 \end{cases}, \quad (4.11)$$

$$C = |1 \tilde{N}_v^j(i) \tilde{N}_v^j(i)^2 \dots \tilde{N}_v^j(i)^m|, \quad (4.12)$$

$$m = \begin{cases} 4, & \text{если } l = 1, 3, 4, 6 \\ 0, & \text{если } l = 2, 5 \end{cases}$$

$$N_v^j(i) = \tilde{N}_v^j(i) - \delta N_v^j(i) + N_0^j, \quad (4.14)$$

где \vec{a}_v^l – вектор коэффициентов аппроксимирующего полинома, рассчитанный в соответствии с алгоритмами 3.6;

$v = T, P, B$ – индекс ДК;

l – номер диапазона информации ДК;

N_0^j – номинальное значение уставки в j -ой измерительной серии.

4.2 Алгоритмы аппроксимации информации с ДК

На каждом такте производятся следующие вычисления:

$$\Delta N_v^j(i) = N_v^j(i) - N_v^j(i-1), \quad (4.15)$$

$$N_{0v}^j(i) = N_v^j(i) - N_{vy}^j, \quad (4.16)$$

где $i = 1, \dots, n_j$ – номер такта;

j – номер ориентации;

$N_v^j(i)$ – массив информации v -го ДК ($v = T, P, B$), формируемый в соответствии с 3.11 в зависимости от режима работы.

$N_{vy}^j = N_v^j(1)$ – для режима стабилизации и управления;

$N_{vy}^j = 0$ – для режима удержания.

В режиме удержания по v -ой оси рассчитать:

$$\hat{U}_v^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{0v}^j(i). \quad (4.17)$$

В режиме стабилизации и управления на каждом такте поступления информации провести следующие операции:

$$x_i = x_{i-1} + 4 \left[\frac{4}{i} \varepsilon_i - 6 \left(\frac{5}{i} - \frac{3}{i-1} \right) \varepsilon_{i-1} + 12 \left(\frac{5}{i} - \frac{5}{i-1} + \frac{1}{i-2} \right) \varepsilon_{i-2} - \left(\frac{35}{i} - \frac{45}{i-1} + \frac{15}{i-2} - \frac{1}{i-3} \right) \varepsilon_{i-3} \right],$$

$i = 4, \dots, n, n+1, n+2, n+3,$

$x_1 = x_2 = x_3 = 0,$

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \tau \sum_{l=1}^i (i+1-l) N_{\mu}^j(l), & i = 1, 2, 3 \\ \tau [N_{\mu}^j(i) - N_{\mu}^j(i-1)] - x_{i-1} + 3(\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_{i-2}) + \varepsilon_{i-3}, & i = 4, \dots, n \\ 0, & i = n+1, n+2, n+3 \end{cases} \quad (4.26)$$

где $N_{\mu}^j(i)$ – массив информации μ -го МА ($\mu = \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$), формируемый в соответствии с п.1.1.1 или п.1.1.2 в зависимости от режима работы.

Рассчитать коэффициенты аппроксимации l_1, l_2, l_3 по соотношениям п.1.2.4 и $\hat{F}_{\mu}^j, \hat{V}_{\mu}^j$ по соотношениям п.1.2.5.

В режиме стабилизации СП на каждом такте провести следующие операции:

$$x_i = x_{i-1} + 5 \left[\frac{5}{i} \varepsilon_i - 20 \left(\frac{3}{i} - \frac{2}{i-1} \right) \varepsilon_{i-1} + 30 \left(\frac{7}{i} - \frac{8}{i-1} + \frac{2}{i-2} \right) \varepsilon_{i-2} - \right. \\ \left. - 20 \left(\frac{14}{i} - \frac{21}{i-1} + \frac{9}{i-2} - \frac{1}{i-3} \right) \varepsilon_{i-3} + \left(\frac{126}{i} - \frac{224}{i-1} + \frac{126}{i-2} - \frac{24}{i-3} + \frac{1}{i-4} \right) \varepsilon_{i-4} \right], \\ i = 5, 6, \dots, n, n+1, \dots, n+4, \\ x_1, x_2, x_3, x_4 = 0, \\ z_i = z_{i-1} + x_i, z_4 = 0,$$

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \tau \sum_{k=1}^i (i+1-k) N_{\mu}^j(k), & i = 1, 2, 3, 4 \\ \tau [N_{\mu}^j(i) - N_{\mu}^j(i-1)] - z_{i-1} + 3(\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_{i-2}) + \varepsilon_{i-3}, & i = 5, \dots, n \\ 0, & i = n+1, n+2, n+3, n+4 \end{cases} \quad (4.27)$$

где Δ – относительная константа в соответствии с п.1.1.2.

Рассчитать коэффициенты аппроксимации:

$$d_1 = \frac{1}{4\tau^2} \left[\frac{1}{12} (3n^2 + 24n + 43)x_{n+4} - (n+3)x_{n+3} + \sum_{k=1}^{n+2} (n+3-2k)x_k \right], \quad (4.28)$$

$$d_2 = \frac{1}{6\tau^3} \left[-\frac{1}{2}(n+4)x_{n+4} + \sum_{k=1}^{n+3} x_k \right], \quad (4.29)$$

$$d_3 = \frac{1}{24\tau^4} x_{n+4}. \quad (4.30)$$

Пересчет коэффициентов аппроксимации выходной информации с МА произвести по формулам:

$$\hat{F}_\mu^j = 2d_1 - 3d_2\tau + 4d_3\tau^2,$$

$$\hat{V}_\mu^j = 3(d_2 - 2d_3\tau),$$

$$\hat{E}_\mu^j = 4d_3.$$

$$F_{\mu}^j = (1 + \rho_{\mu}^c) C_H \hat{F}_{\mu}^j - \Delta \tau_{\mu}^c, \quad \hat{F}_{\mu^*}^j = \hat{F}_{\mu}^j - \hat{V}_{\mu}^j T_j, \quad (5.7)$$

$$T_j = (n_j - 1) \tau_j.$$

5.2 Алгоритмы определения нулевых кодов КПУ

Значения нулевых кодов КПУТ₀, P₀, B₀ рассчитать по формулам:

$$U_T^{07} = p_0 \hat{U}_T^{07} - \frac{1}{p_2} \alpha_{np}, \quad (5.8)$$

$$U_P^{07} = p_0 \hat{U}_P^{07} - \frac{1}{p_2} \beta_{np}, \quad (5.9)$$

$$U_B^{09} = \frac{1}{2g} (\hat{F}_{\bar{x}}^{08} - \hat{F}_{\bar{x}}^{09}) (1 + \rho_x) C_H + \frac{p_0 (\hat{U}_B^{08} + \hat{U}_B^{09})}{2} - \frac{1}{p_2} \varphi_{np}, \quad (5.10)$$

$$T_0 = \frac{1}{p_0} U_T^{07};$$

$$P_0 = \frac{1}{p_0} U_P^{07};$$

$$B_0 = \frac{1}{p_0} U_B^{09}.$$

5.3 Алгоритмы определения углов отклонения корпуса прибора относительно горизонта

Определить углы отклонения корпуса прибора относительно горизонта по следующим формулам:

$$\Delta \vartheta^j = p_0 \hat{U}_T^j - U_T^{07}, \quad (5.11)$$

$$\Delta \psi^j = p_0 \hat{U}_P^j - U_P^{07}, \quad (5.12)$$

$$j = 10, 17. \quad (5.13)$$

5.4 Рассчитать уточненные значения точностных параметров МА

По формулам, заменив индексы серий 01, 02, 03, 04, 05, 06 на 11, 12, 13, 14, 15, 16 соответственно. При этом вместо систематических значений точностных

параметров МА использовать вычисленные в сериях 01 – 06 значения $\rho_x, \rho_y, \rho_z, \Delta\tau_x, \Delta\tau_y, \Delta\tau_z$.

5.5 Алгоритмы расчета углов неортогональности осей карданного подвеса СП

Рассчитать углы неортогональности осей карданова подвеса СП по следующим формулам:

$$\varepsilon_{BX} = -\frac{p_2}{2}(n_x^{20} + n_x^{21}) + \frac{\Delta P_{20} - \Delta P_{21}}{2} p_0,$$

$$\varepsilon_{BZ} = \frac{p_2}{2}(n_z^{20} + n_z^{21}) - \frac{\Delta T_{20} - \Delta T_{21}}{2} p_0,$$

$$\varepsilon_{PY} = \frac{p_2}{2(1 - \cos\alpha)}(n_x^{18} + n_x^{19}) + \frac{\Delta T_{18} + \Delta T_{19}}{2(1 - \cos\alpha)} p_0 - \frac{(\Delta B_{18} - \Delta B_{19})\sin\alpha}{2(1 - \cos\alpha)} p_0,$$

$$\varepsilon_{PZ} = \frac{p_2}{2\sin\alpha}(n_x^{19} - n_x^{18}) - \frac{\Delta T_{19} - \Delta T_{18}}{2\sin\alpha} p_0 - \frac{\Delta B_{18} + \Delta B_{19}}{2} p_0,$$

$$\varepsilon_{TX} = \frac{p_2}{2}(n_x^{22} + n_x^{23}) - \frac{\Delta B_{22} + \Delta B_{23}}{2} p_0,$$

$$\varepsilon_{TY} = \frac{p_2}{2}(n_x^{22} - n_x^{23}) + \frac{\Delta B_{23} - \Delta B_{22}}{2} p_0,$$

где $n_\mu^j = \frac{1}{g}(C_H(1 + \rho_\mu)(\hat{F}_\mu^j - \hat{V}_\mu^j T_j) - \Delta\tau_\mu),$

$$\mu = x, z, \quad j = 18, \dots, 23,$$

$$\Delta B_j = \hat{U}_B^j - \alpha_1^j p_0, \quad \Delta P_j = \hat{U}_P^j - \alpha_2^j p_0, \quad \Delta T_j = \hat{U}_T^j - \alpha_3^j p_0,$$

$\alpha_1^j, \alpha_2^j, \alpha_3^j$ – расчетные значения уставок в соответствии с таблицей 2.1.

5.6 Алгоритмы расчета углов установки МА на СП

5.6.1 Рассчитать углы установки акселерометров $\delta_1^{(1)}, \delta_2^{(1)}, \delta_3^{(1)}$ на СП по следующим формулам:

$$\delta_1^{(1)} = \frac{\cos\hat{\delta}_1(\cos\alpha_{24} - \alpha_{24}) - F_z^{24}}{\cos\alpha_{24} + \alpha_{24}} \cdot p_2,$$

$$\hat{\delta}_1 = \frac{1 - \alpha_{24} - F_z^{24}}{\cos\alpha_{24} + \alpha_{24}},$$

$$\alpha_{24} = F_x^{24} - 1,$$

$$F_x^{24} = \frac{\hat{F}_x^{24} C_H (1 + \rho_x) - \Delta\tau_x}{g \sin 45^\circ},$$

$$F_z^{24} = -\frac{\hat{F}_z^{24} C_H (1 + \rho_z) - \Delta\tau_z}{g \sin 45^\circ},$$

$$\delta_2^{(1)} = -\frac{\cos\hat{\delta}_2 (\cos\alpha_{26} + \alpha_{26}) - F_y^{26}}{\cos\alpha_{26} - \alpha_{26}} \cdot p_2 + (1 - \cos\bar{\delta}_3^c) \cdot p_2,$$

$$\hat{\delta}_2 = -\frac{1 + \alpha_{26} - F_y^{26}}{\cos\alpha_{26} - \alpha_{26}},$$

$$\alpha_{26} = 1 - F_x^{26},$$

$$F_x^{26} = -\frac{\hat{F}_x^{26} C_H (1 + \rho_x) - \Delta\tau_x}{g \sin 45^\circ},$$

$$F_y^{26} = \frac{\hat{F}_y^{26} C_H (1 + \rho_y) - \Delta\tau_y}{g \sin 45^\circ},$$

$$\delta_3^{(1)} = -\frac{\cos\hat{\delta}_3 (\cos\alpha_{25} + \alpha_{25}) - F_y^{25}}{\alpha_{25} - \cos\alpha_{25}} \cdot p_2 - (1 - \cos\bar{\delta}_2^c) \cdot p_2,$$

$$\hat{\delta}_3 = -\frac{1 + \alpha_{25} - F_y^{25}}{\alpha_{25} - \cos\alpha_{25}},$$

$$\alpha_{25} = 1 - F_z^{25} - (1 - \cos\bar{\delta}_1^c),$$

$$F_y^{25} = \frac{\hat{F}_y^{25} C_H (1 + \rho_y) - \Delta\tau_y}{g \sin 45^\circ},$$

$$F_z^{25} = -\frac{\hat{F}_z^{25} C_H (1 + \rho_z) - \Delta\tau_z}{g \sin 45^\circ},$$

$$\bar{\delta}_k^c = \frac{\delta_k^c}{p_2}, \quad k = 1, 2, 3.$$

5.6.2 Рассчитать углы установки акселерометров $\delta_1^{(2)}, \delta_2^{(2)}, \delta_3^{(2)}$ на СП по следующим формулам:

$$\delta_1^{(2)} = \delta_1^c + \delta_1^* p_2,$$

$$\delta_2^{(2)} = \delta_2^c + \delta_2^* p_2,$$

$$\delta_3^{(2)} = \delta_3^c + \delta_3^* p_2,$$

$$\delta_1^* = 1 - \frac{1}{g^2} \left[(F_x^{24})^2 + \left(\frac{F_z^{24}}{\sin \bar{\delta}_1^c - \cos \bar{\delta}_1^c} \right)^2 \right],$$

$$\delta_2^* = -1 + \frac{1}{g^2} \left[(F_x^{26})^2 + \left(\frac{F_y^{26}}{\cos \bar{\delta}_3^c \cdot \sin \bar{\delta}_2^c + \cos \bar{\delta}_2^c \cdot \cos \bar{\delta}_3^c} \right)^2 \right],$$

$$\delta_3^* = 1 - \frac{1}{g^2} \left[\left(\frac{F_y^{25}}{\cos \bar{\delta}_2^c \cdot \cos \bar{\delta}_3^c - \sin \bar{\delta}_3^c \cdot \cos \bar{\delta}_2^c} \right)^2 + \left(\frac{F_z^{25}}{\cos \bar{\delta}_1^c} \right)^2 \right].$$

5.7 Уточнение параметров МА

Пересчитать параметры акселерометров $\rho_x, \rho_y, \rho_z, \Delta\tau_x, \Delta\tau_y, \Delta\tau_z$ по алгоритмам п.5.1 с использованием значений углов $\delta_i^{(1)}$, вычисленных по формулам п.5.6.1. При этом значения $\delta_i^{(1)}$ должны быть переведены в радианную меру угла.

6 Алгоритмы определения точностных параметров МА, нулевых кодов КПУ и углов неортогональности осей карданова подвеса СП.

6.1 При определении нулевых кодов КПУ прибор должен быть установлен на СНП. Погрешность выставки прибора в требуемое положение не должна превышать 10".

Положение СП относительно плоскости горизонта, формулы для расчета уставки $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и режимы работы прибора в измерительных сериях показаны в таблицах 2.1 и 2.2. Положение СНП во всех сериях, кроме серий $j = 08, 09$, определяется углами $\vartheta_H = 0^\circ, \varphi_B = 270^\circ$. В сериях $j = 08, 09$ эти углы равны: $\vartheta_H = 90^\circ, \varphi_B = 270^\circ$ и $\vartheta_H = 270^\circ, \varphi_B = 270^\circ$ соответственно.

6.2 Входной информацией для данных алгоритмов являются:

$\hat{U}_v^j (v = T, P, B), \hat{F}_\mu^j, \hat{V}_\mu^j (\mu = x, y, z)$ – коэффициенты аппроксимации, рассчитанные по алгоритмам п.1.2.2 и пп.1.3.1, 1.3.2 соответственно;

$\rho_x^c, \rho_y^c, \rho_z^c, \Delta\tau_x^c, \Delta\tau_y^c, \Delta\tau_z^c, \delta_1^c, \delta_2^c, \delta_3^c$ – систематические значения точностных параметров и углов установки МА;

T_0^c, P_0^c, B_0^c – систематические значения нулевых кодов КПУ;

$\mathcal{E}_{TX}^c, \mathcal{E}_{TY}^c, \mathcal{E}_{PY}^c, \mathcal{E}_{PZ}^c, \mathcal{E}_{BX}^c, \mathcal{E}_{BZ}^c$ – систематические значения углов неортогональности карданова подвеса;

g – ускорение силы тяжести;

CH – номинальное значение масштабного коэффициента МА;

$\varphi_{np}, \alpha_{np}, \beta_{np}$ – углы установки приспособления;

p_2 – коэффициент перевода единиц измерения угла;

p_0 – цена единицы младшего разряда кодового числа ДК;

α – угол поворота СП (см. таблицу приложения А).

На этапе РГ систематические значения точностных параметров принимаются равными нулю.

										Лист
										42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР					

Таблица 6.1

Серия j	Положение СП	$\alpha_1(\varphi)$	$\alpha_2(\psi)$	$\alpha_3(\vartheta)$
01		$B_0^c p_0$	$P_0^c p_0$	$T_0^c p_0$
07		$B_0^c p_0$	—	—
10		U_B^{09}	—	—
11		U_B^{09}	$U_P^{07} + \Delta\psi^{10}$	$U_T^{07} + \Delta\vartheta^{10}$
17		U_B^{09}	—	—
02		$B_0^c p_0$	$P_0^c p_0$	$\pi + T_0^c p_0$
12		U_B^{09}	$U_P^{07} - \Delta\psi^{10}$	$\pi + U_T^{07} + \Delta\vartheta^{10}$
03		$B_0^c p_0$	$P_0^c p_0$	$-\frac{\pi}{2} + T_0^c p_0$
13		$U_B^{09} - \Delta\psi^{10}$	U_P^{07}	$U_T^{07} + \Delta\vartheta^{10} - \frac{\pi}{2}$
04		$\pi + B_0^c p_0$	$P_0^c p_0$	$-\frac{\pi}{2} + T_0^c p_0$
14		$U_B^{09} - \Delta\psi^{10} + \pi$	U_P^{07}	$U_T^{07} + \Delta\vartheta^{10} - \frac{\pi}{2}$
05		$\frac{\pi}{2} + B_0^c p_0$	$P_0^c p_0$	$\frac{\pi}{2} + T_0^c p_0$
15		$\frac{\pi}{2} + U_B^{09} + \Delta\psi^{10}$	U_P^{07}	$U_T^{07} + \Delta\vartheta^{10} + \frac{\pi}{2}$
23		$\frac{\pi}{2} + U_B^{09} + \Delta\psi^{17}$	U_P^{07}	$U_T^{07} + \Delta\vartheta^{17} + \frac{\pi}{2}$

6.3 Алгоритмы определения точностных параметров МА

Рассчитать значения точностных параметров МАХ, МАУ, МАZ по следующим формулам:

$$\rho_x = \frac{2g}{C_H(\hat{F}_{x^*}^{03} - \hat{F}_{x^*}^{04})} - 1 - \frac{1}{4}(\varphi_{y3}^2 + \varphi_{y4}^2 + \varphi_{z3}^2 + \varphi_{z4}^2),$$

$$\Delta\tau_x = \frac{\hat{F}_{x^*}^{03} + \hat{F}_{x^*}^{04}}{\hat{F}_{x^*}^{03} - \hat{F}_{x^*}^{04}} g - \frac{1}{4}g(\varphi_{y4}^2 - \varphi_{y3}^2 + \varphi_{z4}^2 - \varphi_{z3}^2),$$

$$\varphi_{y3} = \frac{1}{g}F_y^{03} + \frac{1}{p_2}\delta_2^c, \quad \varphi_{z3} = \frac{1}{g}F_z^{03} - \frac{1}{p_2}\delta_1^c,$$

$$\varphi_{y4} = \frac{1}{g}F_y^{04} - \frac{1}{p_2}\delta_2^c, \quad \varphi_{z4} = \frac{1}{g}F_z^{04} + \frac{1}{p_2}\delta_1^c,$$

$$\rho_y = \frac{2g}{C_H(\hat{F}_{y^*}^{01} - \hat{F}_{y^*}^{02})} - 1 - \frac{1}{4}(\varphi_{x1}^2 + \varphi_{x2}^2 + \varphi_{z1}^2 + \varphi_{z2}^2),$$

$$\Delta\tau_y = \frac{\hat{F}_{y^*}^{01} + \hat{F}_{y^*}^{02}}{\hat{F}_{y^*}^{01} - \hat{F}_{y^*}^{02}} g + \frac{1}{4}g(\varphi_{x1}^2 - \varphi_{x2}^2 + \varphi_{z1}^2 - \varphi_{z2}^2),$$

$$\varphi_{x1} = \frac{1}{g}F_x^{01} + \frac{1}{p_2}\delta_2^c, \quad \varphi_{z1} = \frac{1}{g}F_z^{01} - \frac{1}{p_2}\delta_3^c,$$

$$\varphi_{x2} = \frac{1}{g}F_x^{02} - \frac{1}{p_2}\delta_2^c, \quad \varphi_{z2} = \frac{1}{g}F_z^{02} + \frac{1}{p_2}\delta_3^c,$$

$$\rho_z = \frac{2g}{C_H(\hat{F}_{z^*}^{05} - \hat{F}_{z^*}^{06})} - 1 - \frac{1}{4}(\varphi_{x5}^2 + \varphi_{x6}^2 + \varphi_{y5}^2 + \varphi_{y6}^2),$$

$$\Delta\tau_z = \frac{\hat{F}_{z^*}^{05} + \hat{F}_{z^*}^{06}}{\hat{F}_{z^*}^{05} - \hat{F}_{z^*}^{06}} g + \frac{1}{4}g(\varphi_{x5}^2 - \varphi_{x6}^2 + \varphi_{y5}^2 - \varphi_{y6}^2),$$

$$\varphi_{x5} = -\frac{1}{g}F_x^{05} + \frac{1}{p_2}\delta_1^c, \quad \varphi_{y5} = -\frac{1}{g}F_y^{05} + \frac{1}{p_2}\delta_3^c,$$

$$\varphi_{x6} = \frac{1}{g}F_x^{06} + \frac{1}{p_2}\delta_1^c, \quad \varphi_{y6} = \frac{1}{g}F_y^{06} + \frac{1}{p_2}\delta_3^c,$$

$$F_{\mu}^j = (1 + \rho_{\mu}^c)C_H\hat{F}_{\mu}^j - \Delta\tau_{\mu}^c, \quad \hat{F}_{\mu^*}^j = \hat{F}_{\mu}^j - \hat{V}_{\mu}^jT_j,$$

$$T_j = (n_j - 1)\tau_j.$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

6.4 Алгоритмы определения нулевых кодов КПУ

Значения нулевых кодов КПУТ0, P0, B0 рассчитать по формулам:

$$U_T^{07} = p_0 \hat{U}_T^{07} - \frac{1}{p_2} \alpha_{np},$$

$$U_P^{07} = p_0 \hat{U}_P^{07} - \frac{1}{p_2} \beta_{np},$$

$$U_B^{09} = \frac{1}{2g} (\hat{F}_{\bar{x}}^{08} - \hat{F}_{\bar{x}}^{09})(1 + \rho_x) C_H + \frac{p_0 (\hat{U}_B^{08} + \hat{U}_B^{09})}{2} - \frac{1}{p_2} \varphi_{np},$$

$$T_0 = \frac{1}{p_0} U_T^{07};$$

$$P_0 = \frac{1}{p_0} U_P^{07};$$

$$B_0 = \frac{1}{p_0} U_B^{09}.$$

6.5 Алгоритмы определения углов отклонения корпуса прибора относительно горизонта

Определить углы отклонения корпуса прибора относительно горизонта по следующим формулам:

$$\Delta\vartheta^j = p_0 \hat{U}_T^j - U_T^{07},$$

$$\Delta\psi^j = p_0 \hat{U}_P^j - U_P^{07},$$

$$j = 10, 17.$$

Рассчитать уточненные значения точностных параметров МАпо формулам, заменив индексы серий 01, 02, 03, 04, 05, 06 на 11, 12, 13, 14, 15, 16 соответственно. При этом вместо систематических значений точностных параметров МА использовать вычисленные в сериях 01 – 06 значения $\rho_x, \rho_y, \rho_z, \Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z$.

6.6 Алгоритмы расчета углов неортогональности осей карданова подвеса СП

Рассчитать углы неортогональности осей кардановаподвеса СП по следующим формулам:

$$\varepsilon_{BX} = -\frac{p_2}{2}(n_x^{20} + n_x^{21}) + \frac{\Delta P_{20} - \Delta P_{21}}{2}p_0,$$

$$\varepsilon_{BZ} = \frac{p_2}{2}(n_z^{20} + n_z^{21}) - \frac{\Delta T_{20} - \Delta T_{21}}{2}p_0,$$

$$\varepsilon_{PY} = \frac{p_2}{2(1 - \cos\alpha)}(n_x^{18} + n_x^{19}) + \frac{\Delta T_{18} + \Delta T_{19}}{2(1 - \cos\alpha)}p_0 - \frac{(\Delta B_{18} - \Delta B_{19})\sin\alpha}{2(1 - \cos\alpha)}p_0,$$

$$\varepsilon_{PZ} = \frac{p_2}{2\sin\alpha}(n_x^{19} - n_x^{18}) - \frac{\Delta T_{19} - \Delta T_{18}}{2\sin\alpha}p_0 - \frac{\Delta B_{18} + \Delta B_{19}}{2}p_0,$$

$$\varepsilon_{TX} = \frac{p_2}{2}(n_x^{22} + n_x^{23}) - \frac{\Delta B_{22} + \Delta B_{23}}{2}p_0,$$

$$\varepsilon_{TY} = \frac{p_2}{2}(n_x^{22} - n_x^{23}) + \frac{\Delta B_{23} - \Delta B_{22}}{2}p_0,$$

где $n_\mu^j = \frac{1}{g}(C_H(1 + \rho_\mu)(\hat{F}_\mu^j - \hat{V}_\mu^j T_j) - \Delta\tau_\mu),$

$\mu = x, z, j = 18, \dots, 23,$

$$\Delta B_j = \hat{U}_B^j - \alpha_1^j p_0, \quad \Delta P_j = \hat{U}_P^j - \alpha_2^j p_0, \quad \Delta T_j = \hat{U}_T^j - \alpha_3^j p_0,$$

$\alpha_1^j, \alpha_2^j, \alpha_3^j$ – расчетные значения уставок в соответствии с таблицей 2.1.

6.7 Алгоритмы расчета углов установки МА на СП

Рассчитать углы установки акселерометров $\delta_1^{(1)}, \delta_2^{(1)}, \delta_3^{(1)}$ на СП по следующим формулам:

$$\delta_1^{(1)} = \frac{\cos\hat{\delta}_1(\cos\alpha_{24} - \alpha_{24}) - F_z^{24}}{\cos\alpha_{24} + \alpha_{24}} \cdot p_2,$$

$$\hat{\delta}_1 = \frac{1 - \alpha_{24} - F_z^{24}}{\cos\alpha_{24} + \alpha_{24}},$$

$$\alpha_{24} = F_x^{24} - 1,$$

$$F_x^{24} = \frac{\hat{F}_x^{24} C_H (1 + \rho_x) - \Delta \tau_x}{g \sin 45^\circ},$$

$$F_z^{24} = -\frac{\hat{F}_z^{24} C_H (1 + \rho_z) - \Delta \tau_z}{g \sin 45^\circ},$$

$$\delta_2^{(1)} = -\frac{\cos \hat{\delta}_2 (\cos \alpha_{26} + \alpha_{26}) - F_y^{26}}{\cos \alpha_{26} - \alpha_{26}} \cdot p_2 + (1 - \cos \bar{\delta}_3^c) \cdot p_2,$$

$$\hat{\delta}_2 = -\frac{1 + \alpha_{26} - F_y^{26}}{\cos \alpha_{26} - \alpha_{26}},$$

$$\alpha_{26} = 1 - F_x^{26},$$

$$F_x^{26} = -\frac{\hat{F}_x^{26} C_H (1 + \rho_x) - \Delta \tau_x}{g \sin 45^\circ},$$

$$F_y^{26} = \frac{\hat{F}_y^{26} C_H (1 + \rho_y) - \Delta \tau_y}{g \sin 45^\circ},$$

$$\delta_3^{(1)} = -\frac{\cos \hat{\delta}_3 (\cos \alpha_{25} + \alpha_{25}) - F_y^{25}}{\alpha_{25} - \cos \alpha_{25}} \cdot p_2 - (1 - \cos \bar{\delta}_2^c) \cdot p_2,$$

$$\hat{\delta}_3 = -\frac{1 + \alpha_{25} - F_y^{25}}{\alpha_{25} - \cos \alpha_{25}},$$

$$\alpha_{25} = 1 - F_z^{25} - (1 - \cos \bar{\delta}_1^c),$$

$$F_y^{25} = \frac{\hat{F}_y^{25} C_H (1 + \rho_y) - \Delta \tau_y}{g \sin 45^\circ},$$

$$F_z^{25} = -\frac{\hat{F}_z^{25} C_H (1 + \rho_z) - \Delta \tau_z}{g \sin 45^\circ},$$

$$\bar{\delta}_k^c = \frac{\delta_k^c}{p_2}, \quad k = 1, 2, 3.$$

Рассчитать углы установки акселерометров $\delta_1^{(2)}$, $\delta_2^{(2)}$, $\delta_3^{(2)}$ на СП по следующим формулам:

$$\delta_1^{(2)} = \delta_1^c + \delta_1^* p_2,$$

$$\delta_2^{(2)} = \delta_2^c + \delta_2^* p_2,$$

$$\delta_3^{(2)} = \delta_3^c + \delta_3^* p_2,$$

$$\delta_1^* = 1 - \frac{1}{g^2} \left[(F_x^{24})^2 + \left(\frac{F_z^{24}}{\sin \bar{\delta}_1^c - \cos \bar{\delta}_1^c} \right)^2 \right],$$

$$\delta_2^* = -1 + \frac{1}{g^2} \left[(F_x^{26})^2 + \left(\frac{F_y^{26}}{\cos \bar{\delta}_3^c \cdot \sin \bar{\delta}_2^c + \cos \bar{\delta}_2^c \cdot \cos \bar{\delta}_3^c} \right)^2 \right],$$

$$\delta_3^* = 1 - \frac{1}{g^2} \left[\left(\frac{F_y^{25}}{\cos \bar{\delta}_2^c \cdot \cos \bar{\delta}_3^c - \sin \bar{\delta}_3^c \cdot \cos \bar{\delta}_2^c} \right)^2 + \left(\frac{F_z^{25}}{\cos \bar{\delta}_1^c} \right)^2 \right].$$

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

Для реализации идей требуется координация между несколькими людьми / командами, поэтому для минимизации ошибок и задержек MATLAB помогает автоматизировать путь от исследования до производства.

4. MATLAB имеет профессионально разработанные наборы инструментов.

Ящики для инструментов проходят тщательные испытания, поэтому они не только гарантированно работают, но и хорошо работают вместе. Наборы инструментов MATLAB предоставляют возможность изучать и применять специализированные технологии. Наборы инструментов объединяют среды параллельных вычислений, графические процессоры и генерацию кода C.

5. Визуализация данных и интерактивные приложения

MATLAB имеет отличные встроенные возможности построения графиков. Приложение в MATLAB - это программа с пользовательским интерфейсом, которая автоматизирует задачу или расчет.

6. MatLab доверяют многие

Считается, что MATLAB будет использоваться для множества задач, начиная от отправки космического корабля на Плутон и заканчивая сопоставлением пациентов с трансплантатами и донорами органов до более простых задач, таких как составление отчета для управления. Работа в таких компаниях, как Tesla, Amazon, Facebook, Verizon и Apple, требует знаний о том, как использовать MATLAB и другие языки программирования.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

8 Описание алгоритмов (блок схемы, алгоритмов калибровки, временная диаграмма).

8.1 Математическая модель МА.

Точностные параметры МА и неявные функции в псевдокоде Matlab для перехода от показаний МА к платформе и наоборот.

```
% D1,D2,D3 - углы не ортогональности установки МА
% Tx,Ty,Tz - нулевые сигналы МА
% Px,Py,Pz - масштабные коэффициенты МА
M = @(D1,D2,D3) [1, 0, 0; -sin(D2), cos(D2)*cos(D3),
cos(D2)*sin(D3); sin(D1), 0, cos(D1)];
% Платформа -> МА
PLMA = @(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,gx,gy,gz)
diag(1./(1+[Px Py Pz]))* ...
    [M(D1,D2,D3) [Tx; Ty; Tz]]*[gx; gy; gz; 1];
% МА -> Платформа
MAPL = @(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,max,may,maz)
diag(1+[Px Py Pz])* ...
    [inv(M(D1,D2,D3)) -[Tx; Ty; Tz]]*[max; may; maz; 1];
```

8.2 Математическая модель карданова подвеса.

```
% Матрицы поворот вектора вокруг осей x, y, z
Rx = @(x) [1 0 0; 0 cos(x) -sin(x); 0 sin(x) cos(x)];
Ry = @(x) [cos(x) 0 sin(x); 0 1 0; -sin(x) 0 cos(x)];
Rz = @(x) [cos(x) -sin(x) 0; sin(x) cos(x) 0; 0 0 1];
% Ex,Ez,Ebz,Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo -параметры кардана
% (углы не ортогональности осей и нулевые коды ДК)
% t, p, b - ДК-Т, ДК-Р, ДК-В
% Корпус -> Платформа
CE = @(Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety,To, Po, Bo, t, p, b) ...
```

```
Rx (Ex) *Rz (Ez) *Ry (b+Bo) *Rz (Ebz) *Rx (p+Po) * ...
Ry (Epy) * Rz (t+To) *Ry (Ety) *Rx (EtX) ;
```

8.3 Калибровка параметров МА.

Алгоритм калибровки параметров МА сводится к решению следующей оптимизационной задачи. В каждой измерительной ориентации на платформу и МА действует только вектор силы тяжести g . Проекции g на оси платформы не известны, но точно известна его величина (модуль) в месте проведения испытаний (завод изготовитель, стартовая площадка и т.д.). Параметры МА ищутся из решения оптимизационной задачи по минимизации отклонения g^2 , выраженного через показания МА и их параметры и его истинным известным значением.

Формирование критерия качества и его линеаризация относительно параметров МА для одной измерительной ориентации. Символьные вычисления в псевдокоде Matlab.

```
%% Линеаризация
% МА -> Платформа
MP = MAPL (Tx, Ty, Tz, Px, Py, Pz, D1, D2, D3, ax, ay, az) ;
G2 = MP' * MP; % g^2
% с учетом малости углов D1 D2 D3
G2 = subs (expand (G2), {cos (D1), cos (D2), cos (D3), ...
    sin (D1), sin (D2), sin (D3)}, [1 1 1 D1 D2 D3]);
% pma - искомые точностные параметры МА
pma = [Tx Ty Tz Px Py Pz D1 D2 D3];
Hma = []; p0 = zeros (1, length (pma));
for s = pma
    % оставляем только линейные члены для каждого
    % параметра
    Hma = [Hma subs (diff (G2, s), pma, p0)];
end
```

```
ErrorG2 = g^2 - subs(G2, pma, p0);
% Уравнение линейной регрессии
% ErrorG2 = Hma*pma'
```

Матрица H_{ma} не зависит от углов СНП т.е. от выставки корпуса относительно Земли. Это позволяет выполнять калибровку МА по данному методу как на заводе изготовителе, так и на стартовой площадке, где возможность точной выставки корпуса прибора отсутствует.

8.4 Калибровка кардана.

Алгоритм калибровки карданова подвеса сводится к решению следующей оптимизационной задачи. По уже откалиброванным МА определим точные проекции вектора g на оси платформы в каждой измерительной ориентации. Получим те же проекции выразив их через показания ДК, углы поворота СНП и параметры кардана, в соответствии с его математической моделью. Параметры кардана ищутся исходя из минимизации суммы квадратов отклонения проекций g полученных этими способами.

Формирование критерия качества и его линеаризация относительно параметров кардана для одной измерительной ориентации. Символьные вычисления в псевдокоде Matlab.

```
C = CE(Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo, t, p, b);
% Корпус -> Платформа
% с учетом малости углов B0 P0 T0 Ex Ey Ebz Epy Etx Ety
Cp = subs(expand(C), {cos(Bo), cos(Po), ...
cos(To), cos(Ex), cos(Ez), cos(Ebz), ...
cos(Epy), cos(Etx), cos(Ety) ...
sin(Bo), sin(Po), sin(To), sin(Ex), ...
sin(Ez), sin(Ebz), sin(Epy), sin(Etx), sin(Ety)}, ...
[1 1 1 1 1 1 1 1 1 Bo Po To Ex Ez Ebz Epy Etx Ety]);
% поворот по осям карданова подвеса и СНП
Cp = Cp*Rz(uz)*Ry(uy)*Rx(ux)*Ry(fb)*Rz(tn)*[0; g; 0];
qc = [Ex Ez Ebz Epy Etx Ety To Po Bo];
q0 = zeros(1, length(qc));
```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

55

```

% с учетом малости значений элементов qc
Hc = [];
for s = qc
    % оставляем только линейные члены для каждого
    % параметра
    Hc = [Hc subs(diff(Cp,s),qc,q0)];
end
% свободные от параметров члены
ErrorG = [gx; gy; gz] - subs(Cp,qc,q0);
% преобразование Hc и ErrorG в функции для
% ускорения дальнейших вычислений
f = matlabFunction(Hc,'file','matHc','Vars',[tn fb t p b
g]);
f = matlabFunction(ErrorG,'file','matErrorG','Vars',[tn fb
t p b g gx gy gz]);
% Уравнение линейной регрессии
% ErrorG = Hc*qc'

```

Для калибровки кардана требуется менять не только положение платформы относительно корпуса, но и положение корпуса относительно Земли, для чего требуется СНП. Поэтому калибровку параметров кардана можно выполнить только на заводе изготовителе. Но с учетом стабильности этих параметров (углов не ортогональности осей) это не критично.

8.5 Выбор системы ориентаций для калибровки МА и кардана.

Всего требуется определить 9 параметров МА и 9 параметров кардана

```

pma = [Tx Ty Tz Px Py Pz D1 D2 D3];
qc = [Ex Ez Ebz Epy Etx Ety To Po Vo];

```

требуется минимум 9 независимых ориентаций для формирования матриц линейной регрессии, полученных ранее. Кроме этого, для кардана требуется менять положение корпуса относительно Земли, т.е. использовать СНП. С

задачи. Значения хоть и не идеальные, но и не запредельные, что позволяет рассчитывать на значимые результаты вычислений.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

9 Интерфейс программы

Программа для калибровки МА и карданного подвеса разработана в App Designer системы Matlab, имеет графический интерфейс в штатной программе предприятия вся работа и считывание данных происходит в режиме командной строки. Средства анализа и визуализации результатов, позволяет создавать итоговые отчеты Excel, более понятна при просмотре конечно результата программы. Код интерфейса представлен в приложение Б.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

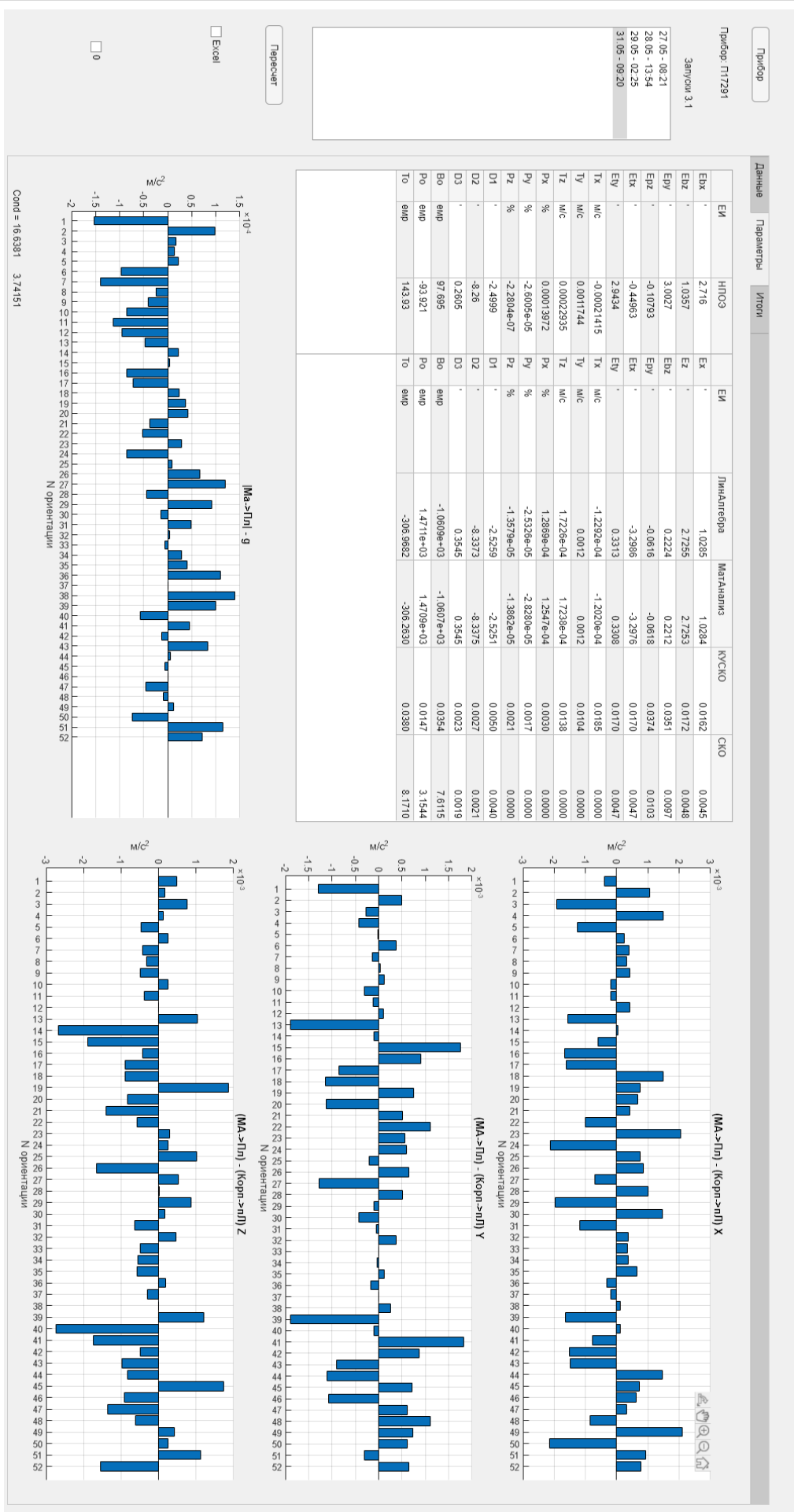


Рисунок.9.2 Пример интерфейса вывода параметров

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

10 Получение оценки параметров МА и кардана.

Для проверки предлагаемой методики был проведен экспериментальный калибровочный запуск на штатном приборе. Результаты первичной обработки информации представлены ниже.

Таблица.10.1.

№ ор	МАХ	МАУ	МАЗ	ДКТ	ДКР	ДКВ	Н	В
1	-7,3646	4,8890	4,2354	0,5236	-0,5236	-1,0472	-90	-90
2	2,4569	-6,0170	7,3698	-2,3562	0,5236	2,3562	-90	0
3	-3,4702	6,9493	-6,0197	-1,5708	0,7854	0,5236	-90	90
4	2,4484	6,0234	-7,3613	-0,7854	0,5236	-2,3562	-90	180
5	0,0032	-9,8143	0,0096	1,5708	0,0000	2,3562	-90	180
6	6,9426	-6,9339	0,0199	3,1416	-0,7854	1,5708	0	0
7	0,0004	9,8150	-0,0133	0,0000	0,0000	2,0944	0	0
8	0,0030	-9,8143	0,0056	3,1416	0,0000	-0,5236	0	90
9	4,2537	-8,5004	2,4639	3,1416	0,5236	-2,0944	0	90
10	-6,9375	6,9397	-0,0200	0,0000	-0,7854	1,5708	0	90
11	-0,0035	9,8150	-0,0009	0,0000	0,0000	0,0000	0	90
12	-4,2581	7,3466	4,8945	-0,5236	0,5236	-1,5708	0	180
13	-0,0043	4,8914	8,4961	3,1416	0,5236	3,1416	90	-90
14	-8,4954	-4,9147	-0,0181	-2,3562	-0,5236	1,5708	90	-90
15	4,8988	6,9434	4,9039	0,0000	0,7854	-2,3562	90	-90
16	-0,0016	-4,8885	-8,4987	0,7854	-0,5236	0,0000	90	-90
17	6,0112	-6,9284	-3,4596	1,5708	-0,7854	-1,0472	90	-90
18	2,1255	7,3715	-6,1348	-2,0944	-0,5236	0,5236	90	0
19	-4,9027	-6,9485	4,9068	1,5708	0,7854	2,3562	90	0
20	-4,9026	-6,9519	4,9020	3,1416	0,7854	-0,7854	90	90
21	7,3575	4,9034	4,2607	-1,0472	-0,5236	1,0472	90	90
22	0,0044	-4,8974	-8,4935	-1,0472	0,5236	3,1416	90	90
23	-0,0030	4,9169	-8,5046	0,7854	-0,5236	3,1416	90	90
24	0,0040	-4,9225	8,5000	1,5708	0,5236	0,0000	90	90
25	4,9111	-6,9264	-4,8953	-1,5708	0,7854	-0,7854	90	180
26	4,9000	6,9392	4,9086	1,5708	-0,7854	-2,3562	90	180

Вычисление оценки параметров

```

% Вычисление параметров по МНК
Xma = Hma\ErrorG2; % Параметры МА
Xc = Hc\ErrorG; % Параметры кардана

% Оценка точности результатов
Pma = inv(Hma'*Hma); % ковариационная матрица для МА
Pc = inv(Hc'*Hc); % ковариационная матрица для кардана
varG2 = var(ErrorG2-Hma*Xma(7:15)); % дисперсия остатка
для МА

% точность оценки параметров МА
stdG2 = sqrt(diag(Pma)*varG2/(26-9));

varG = var(ErrorGMA-Hc*Xc); % дисперсия остатка для
кардана

% точность оценки параметров кардана
stdG = sqrt(diag(Pc)*varG/(3*26-9));
    
```

Результаты вычислений представлены ниже.

Таблица 10.2.

П	ЕИ	НПОЭ		П	ЕИ	ЮУрГУ	КУСКО	СКО
Ebx	'	1.7491		Ex	'	-2,4438	0,0229	0,0095
Ebz	'	-2.4256		Ez	'	1,7449	0,0244	0,0101
Epy	'	2.0177		Ebz	'	0,1731	0,0496	0,0206
Epz	'	-0.24956		Epy	'	0,2124	0,0529	0,0220
Etх	'	-0.30219		Etх	'	1,2280	0,0240	0,0100
Ety	'	-1.6285		Ety	'	0,0744	0,0240	0,0100
Tx	м/с	-0.00010554		Tx	м/с	-0,0001	0,0262	0,0000
Ty	м/с	0.00036777		Ty	м/с	0,0002	0,0147	0,0000
Tz	м/с	-0.00051756		Tz	м/с	-0,0006	0,0195	0,0000
Px	%	0.00015395		Px	%	0,0001	0,0042	0,0000
Py	%	-4.7769e-05		Py	%	0,0000	0,0024	0,0000
Pz	%	0.00012233		Pz	%	0,0001	0,0029	0,0000

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

63

D1	'	5.925		D1	'	5,9531	0,0071	0,0103
D2	'	-0.87498		D2	'	-0,9757	0,0038	0,0055
D3	'	-7.7101		D3	'	-7,7666	0,0033	0,0048
Bo	emp	-213.15		Bo	emp	7,6535	0,0501	16,1686
Po	emp	-401.03		Po	emp	811,8587	0,0208	6,7007
To	emp	37.885		To	emp	-271,6585	0,0538	17,3572

Анализ показывает, что полученные параметры МА хорошо согласуются с результатами по штатной методике НПОЭ. Параметры кардана близки к штатным с точностью до различий в математической модели кардана по методике НПОЭ и новой. Точность оценки параметров удовлетворяет требованиям ТЗ на прибор. Но сравнение значений параметров по новой методике с их расчетными значениями по методике НПОЭ не является главным критерием для оценки их качества. Наиболее объективную картину дает анализ остатков, который представлен ниже.

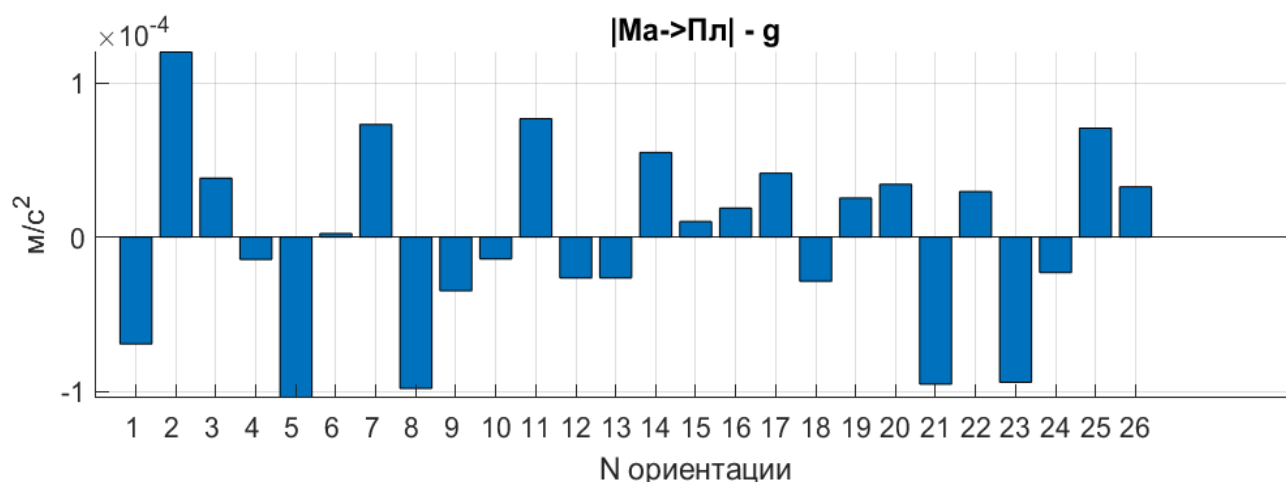


Рисунок 10.1 Ошибка оценки g по параметрам МА в осях платформы.

Как видно из диаграммы, точность оценки по всем ориентациям составляет 0.0001 м/с², при цене младшего разряда МА 0.0008 м/с². Вполне приличный результат.

Анализ остатков после калибровки кардана.

ортогональности осей имеется их конусность при вращении и на показания ДК могут быть наложены паразитные синусоидальные помехи. Однако дальнейшее усложнение математической модели кардана не целесообразно т.к. достигнутые точности достаточны для определения ориентации объекта в инерциальном пространстве и для калибровки ДНГ. Кроме этого, параметры кардана не оказывают влияния на точность решения задачи СИИ в полете.

Программа для калибровки МА и кардана разработана в App Designer системы Matlab, имеет графический интерфейс (у штатных программ НПОЭ вся работа в режиме командной строки), средства анализа и визуализации результатов, позволяет создавать итоговые отчеты Excel.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана новая методика и алгоритмы калибровки МА в составе ТГС с возможностью масштабирования ее на ЧГС.
2. Разработана программа калибровки с графическим интерфейсом.
3. Методика проверена на штатном приборе.
4. Методика легко масштабируется и легко переносится на различные типы ГС.
5. Графический интерфейс понятен даже обычному пользователю.
6. Конечный результат удовлетворяет требованиям ТЗ по допускам на точностные параметры.

					27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

Приложение А

```
% Модель запуска 3.1 (Баланс на платформе)

%% clear
clc
clear
format compact
g0 = 9.814213; deg = pi/180; mr = deg/60; sr = mr/60;
% поворот вектора
Rx = @(x) [1 0 0; 0 cos(x) -sin(x); 0 sin(x) cos(x)];
Ry = @(x) [cos(x) 0 sin(x); 0 1 0; -sin(x) 0 cos(x)];
Rz = @(x) [cos(x) -sin(x) 0; sin(x) cos(x) 0; 0 0 1];
M = @(D1,D2,D3) [1, 0, 0; -sin(D2), cos(D2)*cos(D3),
cos(D2)*sin(D3); sin(D1), 0, cos(D1)];
% Платформа -> МА
PLMA = @(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,gx,gy,gz)
diag(1./(1+[Px Py Pz]))* ...
[M(D1,D2,D3) [Tx; Ty; Tz]]*[gx; gy; gz; 1];
% МА -> Платформа
MAPL = @(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,max,may,maz)
diag(1+[Px Py Pz])* ...
[inv(M(D1,D2,D3)) -[Tx; Ty; Tz]]*[max; may; maz;
1];
% Корпус -> Платформа
CE = @(Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety,To, Po, Bo, t, p, b)
...

Rx(Ex)*Rz(Ez)*Ry(b+Bo)*Rz(Ebz)*Rx(p+Po)*Ry(Epy)*Rz(t+T
o)*Ry(Ety)*Rx(Etx);

%% Символьные переменные
syms D1 D2 D3 real % углы установки МА
syms Ex Ez Ebz Epy Etx Ety real % углы не
ортогональности карданова подвеса (КП)
syms t p b real % углы поворота КП (тангаж, рысканье,
вращение)
syms Px Py Pz Tx Ty Tz real % масштабный коэффициент и
нулевой сигнал МА
syms To Po Bo fb tn real % нули ДК (тангаж, рысканье
вращение), углы поворота СНП (наклонно поворотный
стол)
syms g gx gy gz real % ускорение силы тяжести
syms ax ay az real % показания МА
```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

68

```

syms ux uy uz real % углы установки приспособления

%% Линеаризация
% МА -> Платформа
MP = MAPL(Tx, Ty, Tz, Px, Py, Pz, D1, D2, D3, ax, ay, az);
G2 = MP'*MP; % g^2
% с учетом малости углов D1 D2 D3
G2 = subs(expand(G2), {cos(D1), cos(D2), cos(D3), ...
    sin(D1), sin(D2), sin(D3)}, [1 1 1 D1 D2 D3]);
% qma - искомые точностные параметры МА
qma = [Tx Ty Tz Px Py Pz D1 D2 D3];
Hma = []; q0 = zeros(1, length(qma));
for s = qma
    % оставляем только линейные члены для каждого
    параметра
    Hma = [Hma subs(diff(G2, s), qma, q0)];
end
ErrorG2 = g^2 - subs(G2, qma, q0);

C = CE(Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo, t, p,
b);
% Корпус -> Платформа
% с учетом малости углов B0 P0 T0 Ex Ey Ebz Epy Etx
Ety
Cp =
subs(expand(C), {cos(Bo), cos(Po), cos(To), cos(Ex), cos(Ez)
), cos(Ebz), cos(Epy), cos(Etx), cos(Ety) ...
sin(Bo), sin(Po), sin(To), sin(Ex), sin(Ez), sin(Ebz), sin(E
py), sin(Etx), sin(Ety)}, ...
[1 1 1 1 1 1 1 1 Bo Po To Ex Ez Ebz Epy Etx
Ety]);
% поворота по осям карданова подвеса, углов
приспособления и углов СНП
Cp = Cp*Rz(uz)*Ry(uy)*Rx(ux)*Ry(fb)*Rz(tn)*[0; g; 0];

qc = [Ex Ez Ebz Epy Etx Ety To Po Bo];
q0 = zeros(1, length(qc));
% с учетом малости значений элементов qc
Hc = [];
for s = qc
    % оставляем только линейные члены для каждого
    параметра
    Hc = [Hc subs(diff(Cp, s), qc, q0)];
end

```

```

ErrorG = [gx; gy; gz] - subs(Cp,qc,q0); % свободные
от параметров члены
% преобразование Hc и ErrorG в функции для ускорения
дальнейших вычислений
f = matlabFunction(Hc, 'file', 'matHc', 'Vars', [tn fb ux
uy uz t p b g]);
f =
matlabFunction(ErrorG, 'file', 'matErrorG', 'Vars', [tn fb
ux uy uz t p b g gx gy gz]);
%% Нелинейная модель
J = (g^2 - MP'*MP)^2; % критерий качества
qma = [Tx Ty Tz Px Py Pz D1 D2 D3];
Grad = sym([]); Hes = sym([]);
for i = 1:length(qma)
    Grad(i) = diff(J,qma(i)); % градиент
    for j = i:length(qma)
        Hes(i,j) = diff(Grad(i),qma(j)); % Hessian
    end
end
f =
matlabFunction(J,Grad,Hes, 'file', 'matJGH', 'Vars', [Tx,T
y,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,ax,ay,az,g]);
%% Поиск системы ориентации (план эксперимента)
ux = 0; uy = 0; uz = 0; % приспособление
U = Rz(uz)*Ry(uy)*Rx(ux);
g = 9.81;
% S - все возможные комбинации углов для ориентации
платформы
S = combvec([0 pi/4 pi/2],[-pi/2 -pi/4 0 pi/4 pi/2
3*pi/4 pi],[-pi -3*pi/4 -pi/2 -pi/4 0 pi/4 pi/2],[-
pi/4 0 pi/4],[-pi/2 -pi/4 0 pi/4 pi/2 3*pi/4 pi]);
minC = inf; minP = inf;
% ищем подходящее подмножество ориентаций с cond -> 1
n = 26; % n >= 9
for j = 1:2
    for k = 1:1000
        switch j
            case 1
                while true
                    ind = union(randi([2
height(S)],1,n),[]);
                    if length(ind) == n, break, end
                end
            case 2

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

70

```

        while true
            ind = minind;
            ind(randi([1,n],1)) = randi([1
height(S)],1);
            ind = union(ind,[]);
            if length(ind) == n, break, end
        end
    end
    SS = S(ind,:);
    Dc = []; Dp = [];
    for i = 1:height(SS)
        [tn, fb, t, p, b] = devec(SS(i,:));
        [ax,ay,az] = devec(CE(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
0, 0, t, p, b)*Ry(fb)*Rz(tn)*[0; g0; 0]);
        Dc = [Dc; matHc(tn,fb,ux,uy,uz,t,p,b,g0)];
        Dp = [Dp; 2*[-ax, -ay, -az, ax^2, ay^2,
az^2, -ax*az, ax*ay, -ay*az]]; % Hma
    end
    condC = cond(Dc); % число обусловленности по
всем ориентациям
    condP = cond(Dp);
    if all([condC condP] < [minC minP])
        minC = condC;
        minP = condP;
        minind = ind;
        disp([minC minP])
    end
end
end
SO = sortrows(S(minind,:)/deg);
Smin = sortrows(S(minind,:));
save sma.mat Smin minC minP minind S
SO = [(1:2*n)' [SO; SO]];
T =
table(SO(:,1),SO(:,2),SO(:,3),SO(:,4),SO(:,5),SO(:,6),
'VariableNames',{'N','tn','fb','t','p','b'})
% writetable(T,'Запуск.xlsx','Sheet','Запуск 3.1')

%% Проверка
clc
load sma.mat
deg = pi/180; mr = deg/60; sr = mr/60;
nor = height(Smin);
% случайный набор значений параметров для проверки
вычислений

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

71

```

while true
    X0 = [randi([-30 30],1,6)*mr randi([-10
10],1,3)*.001 randi([-30 30],1,3)*.0001 randi([-30
30],1,6)*mr]';
    if all(abs(X0)>0)
        break
    end
end
[Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, Tx, Ty, Tz, Px, Py, Pz,
D1, D2, D3, To, Po, Bo] = devec(X0);
% прямые вычисления
% для данного набора ориентаций и значений точностных
параметров
% рассчитываем показания МА

% рассчитываем свободную и зависимую составляющую МА
по найденному набору
% ориентаций
ErrorG2 = []; Hma = [];
Hc = [];
MA0 = []; GP0 = [];
ux = 0; uy = 0; uz = 0; % приспособление
U = Rz(uz)*Ry(uy)*Rx(ux);
for i = 1:nor
    [tn, fb, t, p, b] = devec(Smin(i,:));
    C = CE(Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo, t,
p, b);
    [gx,gy,gz] = devec(C*U*Ry(fb)*Rz(tn)*[0; g0; 0]);
    [ax,ay,az] =
devec(PLMA(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,gx,gy,gz));
    MA0 = [MA0; ax ay az];
    GP0 = [GP0; gx gy gz];
    Hc = [Hc; matHc(tn,fb,ux,uy,uz,t,p,b,g0)];
    Hma = [Hma; 2*[-ax, -ay, -az, ax^2, ay^2, az^2, -
ax*az, ax*ay, -ay*az]];
    ErrorG2 = [ErrorG2; g0^2-ax^2-ay^2-az^2];
end
disp([cond(Hma) cond(Hc)])

XLA = Hma\ErrorG2;
% Yma = lsqminnorm(Hma,ErrorG2);

options =
optimoptions('fmincon','Display','iter','Algorithm','t

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

72

```

rust-region-reflective', 'FunctionTolerance', 1e-10,
...

'SpecifyObjectiveGradient', true, 'HessianFcn', 'objective');
ux = 0; uy = 0; uz = 0; % приспособление
U = Rz(uz)*Ry(uy)*Rx(ux);
x0 = zeros(9,1); % ИУ
ub = [.1*ones(3,1); .01*ones(3,1); 60*mr*ones(3,1)];
lb = -ub;
% ищем min квадратичного критерия качества
sum((MA(измерения)-MA(модель))^2)
[XMA,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = ...
    fmincon(@ (x)
funCma(x,X0,Smin,U,g0,CE,Rx,Ry,Rz,PLMA),x0,[],[],[],[]
,lb,ub,[],options);

ErrorGLA = []; GPLA = [];
ErrorGMA = []; GPMA = [];
for i = 1:nor
    [tn, fb, t, p, b] = devec(Smin(i,:));
    [Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3] = devec(XLA);
    gma =
MAPL(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,MA0(i,1),MA0(i,2),MA0(i,3));
    GPLA = [GPLA; gma'];
    [gx,gy,gz] = devec(g0*gma/norm(gma));
    ErrorGLA = [ErrorGLA;
matErrorG(tn,fb,ux,uy,uz,t,p,b,g0,gx,gy,gz)];
    [Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3] = devec(XMA);
    gma =
MAPL(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,MA0(i,1),MA0(i,2),MA0(i,3));
    GPMA = [GPMA; gma'];
    [gx,gy,gz] = devec(g0*gma/norm(gma));
    ErrorGMA = [ErrorGMA;
matErrorG(tn,fb,ux,uy,uz,t,p,b,g0,gx,gy,gz)];
end
YLA = Hc\ErrorGLA;
YMA = Hc\ErrorGMA;
[Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo] = devec(YLA);
[Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3] = devec(XLA);
XLA = [Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, Tx, Ty, Tz, Px, Py,
Pz, D1, D2, D3, To, Po, Bo]';
[Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo] = devec(YMA);

```



```

[Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3] = devec(XMA);
XMA = [Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, Tx, Ty, Tz, Px, Py,
Pz, D1, D2, D3, To, Po, Bo]';

emr = [mr*ones(1,6) ones(1,6) mr*ones(1,6)]';

T = [[X0 XLA XMA X0-XLA X0-XMA]./emr];
Pma = inv(Hma'*Hma); % ковариационная матрица
Pc = inv(Hc'*Hc); % ковариационная матрица

% точность оценки параметров
varG2 = var(ErrorG2-Hma*XMA(7:15));
stdG2 = sqrt(diag(Pma)*varG2/(nor-length(XMA)));
varG = var(ErrorGMA-Hc*YMA);
stdG = sqrt(diag(Pc)*varG/(3*nor-length(YMA)));
stdma = [stdG(1:6); stdG2; stdG(7:9)]./emr;

disp([mean(vecnorm(GPLA-GP0,2,2)) mean(vecnorm(GPMA-
GP0,2,2))])

ei = [' ' ' '; ' ' ' '; ' ' ' '; ' ' ' '; ' ' ' '; ' ' ' ';
'M/c'; 'M/c'; 'M/c'; ' % '; ' % '; ' % '; ' ' ' '; ' ' '
'; ' ' ' '; ' ' ' '; ' ' ' ];
par = ['Ex '; 'Ez '; 'Ebz'; 'Epy'; 'Etx'; 'Ety'; 'Tx
'; 'Ty '; 'Tz '; 'Px '; 'Py '; 'Pz '; 'D1 '; 'D2 ';
'D3 '; 'Bo '; 'Po '; 'To '];
T1 =
table(par,ei,T(:,1),T(:,2),T(:,3),T(:,4),T(:,5),stdma,
...

'VariableNames',{ 'P', 'EI', 'X0', 'XLA', 'XMA', 'ErrLA', 'Er
rMA', 'std'})
save param_mod.mat X0 XLA XMA T1 emr ei par

```

Приложение Б

```
classdef app31new < matlab.apps.AppBase

% Properties that correspond to app components
properties (Access = public)
Zap31UIFigure matlab.ui.Figure
LoadData matlab.ui.control.Button
Label matlab.ui.control.Label
ListZaps matlab.ui.control.ListBox
Plant matlab.ui.control.Label
TabGroup matlab.ui.container.TabGroup
Tab matlab.ui.container.Tab
UITableMADK matlab.ui.control.Table
Tab_2 matlab.ui.container.Tab
UITableParam matlab.ui.control.Table
UITableParNPOE matlab.ui.control.Table
Cond matlab.ui.control.Label
UIAxesErrPLX matlab.ui.control.UIAxes
UIAxesErrG2 matlab.ui.control.UIAxes
UIAxesErrPLY matlab.ui.control.UIAxes
UIAxesErrPLZ matlab.ui.control.UIAxes
Tab_3 matlab.ui.container.Tab
UITableTotal matlab.ui.control.Table
ButtonTotal matlab.ui.control.Button
CheckBoxCalc matlab.ui.control.CheckBox
CheckBoxExcel matlab.ui.control.CheckBox
CheckBox0 matlab.ui.control.CheckBox
end

properties (Access = public)
plant = '';
end
methods (Access = private)
function res = TableExel(app,UIT,file,sheet,range)
T = table;
for i = 1:width(UIT.Data)
T(:,i) = table(UIT.Data(:,i));
```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

75

```

end
T.Properties.VariableNames = UIT.ColumnName';
T.Properties.RowNames = UIT.RowName;
if app.CheckBoxExcel.Value
writetable(T,file,'Sheet',sheet,'Range',range,'WriteRowName
s',true,'WriteMode','overwritesheet');
end
res = true;
end
end

% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)

% Button pushed function: LoadData
function LoadDataButtonPushed(app, event)
datadir = uigetdir('..\Data\','Прибор');
app.plant = datadir(end-5:end); % № прибора
app.Plant.Text = "Прибор: " + app.plant;
dirdata = {};
q = dir([datadir '\31\']);
k = 1;
LZI = {}; LZV = {};
app.ListZaps.Items = {};
app.ListZaps.ItemsData = {};
for i = 3:length(q)
if q(i)..isdir
s = dir([datadir '\31\' q(i).name]);
for j = 3:length(s)
if s(j)..isdir
dirdata{k} = s(j).folder + "\" + s(j).name + "\";
c = split(dirdata{k},'\');
app.ListZaps.Items{k} = char(c{end-2}(4:5)+"."+c{end-
2}(1:2)+" - "+c{end-1}(1:2)+":"+c{end-1}(4:5));
app.ListZaps.ItemsData{k} = char(dirdata{k});
k = k + 1;
end
end
end
end
app.UITableTotal.Data = [];
end

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

76

```

% Value changed function: ListZaps
function ListZapsValueChanged(app, event)
g0 = 9.814213; deg = pi/180; mr = deg/60; sr = mr/60;
% поворот вектора
Rx = @(x) [1 0 0; 0 cos(x) -sin(x); 0 sin(x) cos(x)];
Ry = @(x) [cos(x) 0 sin(x); 0 1 0; -sin(x) 0 cos(x)];
Rz = @(x) [cos(x) -sin(x) 0; sin(x) cos(x) 0; 0 0 1];
M = @(D1,D2,D3) [1, 0, 0; -sin(D2), cos(D2)*cos(D3),
cos(D2)*sin(D3); sin(D1), 0, cos(D1)];
% Платформа -> МА
PLMA = @(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,gx,gy,gz)
diag(1./(1+[Px Py Pz]))* ...
[M(D1,D2,D3) [Tx; Ty; Tz]]*[gx; gy; gz; 1];
% МА -> Платформа
MAPL = @(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,max,may,maz) diag(1+[Px
Py Pz])* ...
[inv(M(D1,D2,D3)) -[Tx; Ty; Tz]]*[max; may; maz; 1];
% Корпус -> Платформа
CE = @(Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo, t, p, b) ...
Rx(Ex)*Rz(Ez)*Ry(b+Bo)*Rz(Ebz)*Rx(p+Po)*Ry(Epy)*Rz(t+To)*Ry
(Ety)*Rx(Etx);
% CEo = @(Ebx, Ebz, Epy, Epz, Etx, Ety, To, Po, Bo, t, p,
b) ...
% Rz(-Ebx)*Rx(-Ebz)*Ry(b-Bo)*Rz(-Epy)*Ry(-Epz)*Rx(p-
Po)*Rx(Ety)*Ry(Etx)*Rz(t-To);
CEo = @(Ebx, Ebz, Epy, Epz, Etx, Ety, To, Po, Bo, t, p, b)
...
Rz(Ebx)*Rx(Ebz)*Ry(b+Bo)*Rz(Epy)*Ry(Epz)*Rx(p+Po)*Rx(Ety)*R
y(Etx)*Rz(t+To);
Cma = 0.0008; Cdk = pi/2^23; % цена единицы младшего
разряда МА и ДК
emr = [ones(1,6)*mr ones(1,6) ones(1,3)*mr ones(1,3)*Cdk]';
ei = [" ' "; " ' "; " ' "; " ' "; " ' "; " ' "
"; "м/с"; "м/с"; "м/с"; " % "; " % "; " % "; " ' "; " ' "; " ' "
"; "emp"; "emp"; "emp"];
par = ['Ex ' ; 'Ez ' ; 'Ebz ' ; 'Epy ' ; 'Etx ' ; 'Ety ' ; 'Tx ' ; 'Ty
' ; 'Tz ' ; 'Px ' ; 'Py ' ; 'Pz ' ; 'D1 ' ; 'D2 ' ; 'D3 ' ; 'Bo ' ;
'Po ' ; 'To ' ];
parnpoe = ['Ebx' ; 'Ebz' ; 'Epy' ; 'Epz' ; 'Etx' ; 'Ety' ; 'Tx ' ;
'Ty ' ; 'Tz ' ; 'Px ' ; 'Py ' ; 'Pz ' ; 'D1 ' ; 'D2 ' ; 'D3 ' ; 'Bo
' ; 'Po ' ; 'To ' ];
% Матрицы поворота вектора вокруг осей X, Y, Z

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

77

```

value = app.ListZaps.Value;
flagNPOE = 3; % 1-НПОЭ, 2-ЮУрГу, 3-НПОЭ+ЮУрГу
if ~app.CheckBoxCalc.Value && isfile([value 'data.mat'])
load([value 'data.mat'])
else
% Read Data
listdata = ls([value 'z31s*.dat']);
nor = height(listdata);
MADK = zeros(nor,6);
switch flagNPOE
case 1 % НПОЭ
dT = .1*ones(nor,1); dT([7 10 17]) = 1; % 3.1
case 2 % ЮУрГу
dT = .1*ones(nor,1); % 3.1
case 3 % НПОЭ+ЮУрГу
dT = .1*ones(52,1); % 3.1
dT1 = .1*ones(26,1); dT1([7 10 17]) = 1; % 3.1
dT = [dT; dT1; dT1];
clear dT1;
end
for i = 1:nor
fileID = fopen([value listdata(i,:)]);
A = fscanf(fileID, '%d');
fclose(fileID);
A = reshape(A,[6 length(A)/6]);
for j = 4:6
B = A(:,j)*Cdk;
% удаляем разрывы в показаниях ДК
ind = B < -pi/2;
if any(B>pi/2) && any(ind)
B(ind) = 2*pi + B(ind);
end
A(:,j) = medfilt1(B,5); % удаляем аномальные измерения
(медианный фильтр)
end
% осреднение по всем замерам в данной ориентации
MADK(i,:) = mean(A).*[Cma/dT(i) Cma/dT(i) Cma/dT(i) 1 1 1];
end
% Чтение параметров из протокола
load([value 'Z31param.mat'],'zp')
Xo = zp;
fileID = fopen([value 'PARVVED.DAT']);
line = fgetl(fileID);
Xoo = [];

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

78

```

Xoo = [Xoo; fscanf(fileID, '%f')];
fclose(fileID);
ux = Xoo(38)*mr;
uy = Xoo(39)*mr;
uz = Xoo(37)*mr;
switch flagNPOE
case 1 % НПОЭ
NPS = [zeros(nor,1) ones(nor,1)*270];
NPS(8,1) = 90; NPS(9,1) = 270; % 3.1
case 2 % ЮУрГУ
NPS = getNPS;
case 3 % НПОЭ+ЮУрГУ
NPS = getNPS;
NPS1 = [zeros(26,1) ones(26,1)*270];
NPS1(8,1) = 90; NPS1(9,1) = 270; % 3.1
NPS = [NPS; NPS1; NPS1];
clear NPS1
end
NPS = NPS*deg;
Hma = []; Hc = []; ErrorG2 = [];
switch flagNPOE
case {1,2}
i0 = str2num(listdata(1,5:6))-1;
case 3
i0 = str2num(listdata(1,5:7))-1;
end
for i = 1:nor
[tn, fb] = devec(NPS(i+i0,:));
[ax, ay, az, t, p, b] = devec(MADK(i,1:6));
Hc = [Hc; matHc(tn,fb,ux,uy,uz,t,p,b,g0)];
Hma = [Hma; 2*[-ax, -ay, -az, ax^2, ay^2, az^2, -ax*az,
ax*ay, -ay*az]];
ErrorG2 = [ErrorG2; g0^2-ax^2-ay^2-az^2];
end
condH = [cond(Hma) cond(Hc)];

XLA = Hma\ErrorG2;

options =
optimoptions('fmincon','Display','iter','Algorithm','trust-
region-reflective','FunctionTolerance',1e-10, ...
'SpecifyObjectiveGradient',true,'HessianFcn','objective');

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

79

```

U = Rz(uz)*Ry(uy)*Rx(ux);
x0 = zeros(9,1); % НУ
ub = [.1*ones(3,1); .01*ones(3,1); 60*mr*ones(3,1)];
lb = -ub;
% ищем min квадратичного критерия качества
sum((MA(измерения)-MA(модель))^2)
[XMA,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = ...
fmincon(@(x)
funC31(x,MADK,g0),x0,[],[],[],[],lb,ub,[],options);
ErrorGLA = []; GPLA = [];
ErrorGMA = []; GPMA = [];
ErrorG0 = []; GP0 = [];
for i = 1:nor
[tn, fb] = devec(NPS(i+i0,:));
[ax,ay,az, t, p, b] = devec(MADK(i,:));
[Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3] = devec(XLA);
gma = MAPL(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,ax,ay,az);
GPLA = [GPLA; gma'];
[gx,gy,gz] = devec(g0*gma/norm(gma));
ErrorGLA = [ErrorGLA;
matErrorG(tn,fb,ux,uy,uz,t,p,b,g0,gx,gy,gz)];
[Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3] = devec(XMA);
gma = MAPL(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,ax,ay,az);
GPMA = [GPMA; gma'];
[gx,gy,gz] = devec(g0*gma/norm(gma));
ErrorGMA = [ErrorGMA;
matErrorG(tn,fb,ux,uy,uz,t,p,b,g0,gx,gy,gz)];
gma = MAPL(0,0,0,0,0,0,0,0,0,ax,ay,az);
[Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3] = devec(Xo(7:15).*[1 1 1 1 1 1
mr mr mr]');
gma = MAPL(Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3,ax,ay,az);
GP0 = [GP0; gma'];
[gx,gy,gz] = devec(g0*gma/norm(gma));
ErrorG0 = [ErrorG0;
matErrorG(tn,fb,ux,uy,uz,t,p,b,g0,gx,gy,gz)];
end
YLA = Hc\ErrorGLA;
YMA = Hc\ErrorGMA;
[Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo] = devec(YLA);
[Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3] = devec(XLA);
XLA = [Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, Tx, Ty, Tz, Px, Py, Pz,
D1, D2, D3, To, Po, Bo]';
[Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo] = devec(YMA);
[Tx,Ty,Tz,Px,Py,Pz,D1,D2,D3] = devec(XMA);

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

80

```

XMA = [Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, Tx, Ty, Tz, Px, Py, Pz,
D1, D2, D3, To, Po, Bo]';
GPL = []; GPL0 = [];
for i = 1:nor
[tn, fb] = devec(NPS(i+i0,:));
[t, p, b] = devec(MADK(i,4:6));
[Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo] = devec(YMA);
C = CE(Ex, Ez, Ebz, Epy, Etx, Ety, To, Po, Bo, t, p, b);
[gx,gy,gz] = devec(C*U*Ry(fb)*Rz(tn)*[0; g0; 0]);
GPL = [GPL; gx gy gz];
[Ebx, Ebz, Epy, Epz, Etx, Ety, To, Po, Bo] = ...
devec(Xo([1:6 16:18]).*[mr mr mr mr mr mr Cdk Cdk Cdk]');
C = CEo(Ebx, Ebz, Epy, Epz, Etx, Ety, To, Po, Bo, t, p, b);
[gx,gy,gz] = devec(C*U*Ry(fb)*Rz(tn)*[0; g0; 0]);
GPL0 = [GPL0; gx gy gz];
end

Pma = inv(Hma'*Hma); % ковариационная матрица
Pc = inv(Hc'*Hc); % ковариационная матрица

% точность оценки параметров
varG2 = var(ErrorG2-Hma*XMA(7:15));
stdG2 = sqrt(diag(Pma)*varG2/(nor-length(XMA)));
varG = var(ErrorGMA-Hc*YMA);
stdG = sqrt(diag(Pc)*varG/(3*nor-
length(YMA)));
stdma = [stdG(1:6); stdG2; stdG(7:9)]./emr;
dPc = diag(Pc);
diagP = sqrt([dPc(1:6); diag(Pma);
dPc(7:9)]);

disp([mean(vecnorm(GPLA-GPL,2,2))
mean(vecnorm(GPMA-GPL,2,2))])

save([value
'data.mat'], 'stdma', 'XLA', 'XMA', 'Xo', 'NPS', 'MADK', 'nor',
...
'GPLA', 'GPMA', 'GPL', 'GPL0', 'GP0', 'diagP', 'condH', 'i0');

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата


```

writetable(T,file,'Sheet',sheet,'Range','V1','WriteMode','i
nplace');
    end
    % legend(app.UIAxesErrPLX,'X','Y','Z')

    if app.CheckBox0.Value
        bar(app.UIAxesErrPLX,nori,[GPMA(:,1)-
GPL(:,1) GP0(:,1)-GPL0(:,1)])
    else
        bar(app.UIAxesErrPLX,nori,GPMA(:,1)-
GPL(:,1))
    end
    grid(app.UIAxesErrPLX,'on')
    app.UIAxesErrPLX.XTick = nori;
    app.UIAxesErrPLX.XTickLabel = num2cell(nori,1);

    if app.CheckBox0.Value
        bar(app.UIAxesErrPLY,nori,[GPMA(:,2)-
GPL(:,2) GP0(:,2)-GPL0(:,2)])
    else
        bar(app.UIAxesErrPLY,nori,GPMA(:,2)-
GPL(:,2))
    end
    grid(app.UIAxesErrPLY,'on')
    app.UIAxesErrPLY.XTick = nori;
    app.UIAxesErrPLY.XTickLabel = num2cell(nori,1);

    if app.CheckBox0.Value
        bar(app.UIAxesErrPLZ,nori,[GPMA(:,3)-
GPL(:,3) GP0(:,3)-GPL0(:,3)])
    else
        bar(app.UIAxesErrPLZ,nori,GPMA(:,3)-
GPL(:,3))
    end
    grid(app.UIAxesErrPLZ,'on')
    app.UIAxesErrPLZ.XTick = nori;
    app.UIAxesErrPLZ.XTickLabel = num2cell(nori,1);

if app.CheckBox0.Value
bar(app.UIAxesErrG2,nori,[vecnorm(GPMA,2,2)
vecnorm(GP0,2,2)]-g0)

```

```

else
bar(app.UIAxesErrG2,nori,vecnorm(GPMA,2,2)-g0)
end
grid(app.UIAxesErrG2,'on')
app.UIAxesErrG2.XTick = nori;
app.UIAxesErrG2.XTickLabel = num2cell(nori,1);
% if app.CheckBoxExcel.Value
%
writetable(T,file,'Sheet',sheet,'Range','J1','WriteRowNames
',true,'WriteMode','inplace');
% end
end

% Button pushed function: ButtonTotal
function ButtonTotalPushed(app, event)
g0 = 9.814213; deg = pi/180; mr = deg/60; sr = mr/60;
Cma = 0.0008; Cdk = pi/2^23; % цена единицы младшего
разряда МА и ДК
emr = [ones(1,6)*mr ones(1,6) ones(1,3)*mr ones(1,3)*Cdk]';
ei = [" ' "; " ' "; " ' "; " ' "; " ' "; " ' '
"; "м/с"; "м/с"; "м/с"; " % "; " % "; " % "; " ' "; " ' "; " '
"; "emp"; "emp"; "emp"];
par = ['Ex '; 'Ez '; 'Ebz'; 'Epy'; 'Etx'; 'Ety'; 'Tx '; 'Ty
'; 'Tz '; 'Px '; 'Py '; 'Pz '; 'D1 '; 'D2 '; 'D3 '; 'Bo ';
'Po '; 'To '];
parnpoe = ['Ebx'; 'Ebz'; 'Epy'; 'Epz'; 'Etx'; 'Ety'; 'Tx ';
'Ty '; 'Tz '; 'Px '; 'Py '; 'Pz '; 'D1 '; 'D2 '; 'D3 '; 'Bo
'; 'Po '; 'To '];
k = 0;
for i = 1:length(app.ListZaps.Items)
if isfile([app.ListZaps.ItemsData{i} 'data.mat'])
k = k + 1;
CN(k) = string(app.ListZaps.Items{i});
load([app.ListZaps.ItemsData{i} 'data.mat'])
D(:,k) = XMA./emr;
end
end
if k > 0
app.UITableTotal.ColumnName = ["EI",CN, "Среднее", "СКО"];
XMA = mean(D,2);
D(:,k+1:k+2) = [XMA std(D,0,2)];
T = table(ei);
for i = 1:width(D)

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

```

T(:,i+1) = table(D(:,i));
end
app.UITableTotal.Data = T;
app.UITableTotal.RowName = string(par);
file = [app.plant '_31.xlsx'];
T.Row = string(par);
T.Properties.VariableNames = app.UITableTotal.ColumnName;
if app.CheckBoxExcel.Value
writetable(T,file,'Sheet','Игор','Range','A1','WriteRowName
s',true,'WriteMode','inplace');
end
datadir = app.ListZaps.ItemsData{1};
i = strfind(datadir,'\31\');
save([datadir(1:i+3) 'param31.mat'], 'Xo', 'XMA')
end

end
end

% Component initialization
methods (Access = private)

% Create UIFigure and components
function createComponents(app)

% Create Zap31UIFigure and hide until all components are
created
app.Zap31UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
app.Zap31UIFigure.Position = [100 100 1411 731];
app.Zap31UIFigure.Name = 'Zap31';

% Create LoadData
app.LoadData = uibutton(app.Zap31UIFigure, 'push');
app.LoadData.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@LoadDataButtonPushed, true);
app.LoadData.BusyAction = 'cancel';
app.LoadData.Position = [29 670 95 22];
app.LoadData.Text = 'Прибор';

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

85

```

% Create Label
app.Label = uilabel(app.Zap31UIFigure);
app.Label.HorizontalAlignment = 'center';
app.Label.Position = [29 577 102 27];
app.Label.Text = 'Запуски 3.1';

% Create ListZaps
app.ListZaps = uilistbox(app.Zap31UIFigure);
app.ListZaps.Items = {};
app.ListZaps.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@ListZapsValueChanged, true);
app.ListZaps.Position = [29 403 102 165];
app.ListZaps.Value = {};

% Create Plant
app.Plant = uilabel(app.Zap31UIFigure);
app.Plant.Position = [29 624 162 22];
app.Plant.Text = 'Прибор';

% Create TabGroup
app.TabGroup = uitabgroup(app.Zap31UIFigure);
app.TabGroup.Position = [150 19 1234 673];

% Create Tab
app.Tab = uitab(app.TabGroup);
app.Tab.Title = 'Данные';

% Create UITableMADK
app.UITableMADK = uitable(app.Tab);
app.UITableMADK.ColumnName = {'MAX'; 'MAY'; 'MAZ'; 'ДКТ';
'ДКР'; 'ДКВ'; 'Н'; 'В'};
app.UITableMADK.RowName = {'1,2,3'};
app.UITableMADK.Position = [18 90 774 537];

% Create Tab_2
app.Tab_2 = uitab(app.TabGroup);
app.Tab_2.Title = 'Параметры';

% Create UITableParam

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

86

```

app.UITableParam = uitable(app.Tab_2);
app.UITableParam.ColumnName = {'EI'; 'ЛинАлгебра';
'MатАнализ'; 'КУСКО'; 'СКО'};
app.UITableParam.RowName = {};
app.UITableParam.Position = [184 252 422 375];

% Create UITableParNPOE
app.UITableParNPOE = uitable(app.Tab_2);
app.UITableParNPOE.ColumnName = {'EI'; 'НПОЭ'};
app.UITableParNPOE.RowName = {};
app.UITableParNPOE.Position = [18 252 167 375];

% Create Cond
app.Cond = uilabel(app.Tab_2);
app.Cond.Position = [10 1 184 22];
app.Cond.Text = 'Cond';

% Create UIAxesErrPLX
app.UIAxesErrPLX = uiaxes(app.Tab_2);
title(app.UIAxesErrPLX, '(МА->Пл) - (Корп->пл) X')
xlabel(app.UIAxesErrPLX, 'N ориентации')
ylabel(app.UIAxesErrPLX, 'м/с^2')
zlabel(app.UIAxesErrPLX, 'Z')
app.UIAxesErrPLX.XTick = [];
app.UIAxesErrPLX.XTickLabel = '';
app.UIAxesErrPLX.XGrid = 'on';
app.UIAxesErrPLX.YGrid = 'on';
app.UIAxesErrPLX.Position = [625 424 583 194];

% Create UIAxesErrG2
app.UIAxesErrG2 = uiaxes(app.Tab_2);
title(app.UIAxesErrG2, '|Ма->Пл| - g')
xlabel(app.UIAxesErrG2, 'N ориентации')
ylabel(app.UIAxesErrG2, 'м/с^2')
zlabel(app.UIAxesErrG2, 'Z')
app.UIAxesErrG2.PlotBoxAspectRatio = [3.62365591397849 1
1];
app.UIAxesErrG2.XTick = [1 2];
app.UIAxesErrG2.XTickLabel = {'1'; '2'};
app.UIAxesErrG2.Position = [23 13 583 237];

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

87

```

% Create UIAxesErrPLY
app.UIAxesErrPLY = uiaxes(app.Tab_2);
title(app.UIAxesErrPLY, '(MA->Пл) - (Корп->пл) Y')
xlabel(app.UIAxesErrPLY, 'N ориентации')
ylabel(app.UIAxesErrPLY, 'м/с^2')
zlabel(app.UIAxesErrPLY, 'Z')
app.UIAxesErrPLY.XTick = [];
app.UIAxesErrPLY.XTickLabel = '';
app.UIAxesErrPLY.XGrid = 'on';
app.UIAxesErrPLY.YGrid = 'on';
app.UIAxesErrPLY.Position = [625 220 583 194];

% Create UIAxesErrPLZ
app.UIAxesErrPLZ = uiaxes(app.Tab_2);
title(app.UIAxesErrPLZ, '(MA->Пл) - (Корп->пл) Z')
xlabel(app.UIAxesErrPLZ, 'N ориентации')
ylabel(app.UIAxesErrPLZ, 'м/с^2')
zlabel(app.UIAxesErrPLZ, 'Z')
app.UIAxesErrPLZ.XTick = [];
app.UIAxesErrPLZ.XTickLabel = '';
app.UIAxesErrPLZ.XGrid = 'on';
app.UIAxesErrPLZ.YGrid = 'on';
app.UIAxesErrPLZ.Position = [625 15 583 194];

% Create Tab_3
app.Tab_3 = uitab(app.TabGroup);
app.Tab_3.Title = 'Итоги';

% Create UITableTotal
app.UITableTotal = uitable(app.Tab_3);
app.UITableTotal.ColumnName = '';
app.UITableTotal.RowName = {};
app.UITableTotal.Position = [37 138 658 476];

% Create ButtonTotal
app.ButtonTotal = uibutton(app.Tab_3, 'push');
app.ButtonTotal.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@ButtonTotalPushed, true);
app.ButtonTotal.Position = [85 90 100 22];

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

88

```

app.ButtonTotal.Text = 'Итого';

% Create CheckBoxCalc
app.CheckBoxCalc = uicheckbox(app.Zap31UIFigure);
app.CheckBoxCalc.Text = 'Пересчет';
app.CheckBoxCalc.Position = [29 339 75 22];

% Create CheckBoxExcel
app.CheckBoxExcel = uicheckbox(app.Zap31UIFigure);
app.CheckBoxExcel.Text = 'Excel';
app.CheckBoxExcel.Position = [28 271 51 22];

% Create CheckBox0
app.CheckBox0 = uicheckbox(app.Zap31UIFigure);
app.CheckBox0.Text = '0';
app.CheckBox0.Position = [47 120 29 22];

% Show the figure after all components are created
app.Zap31UIFigure.Visible = 'on';
end
end

% App creation and deletion
methods (Access = public)

% Construct app
function app = app31new

% Create UIFigure and components
createComponents(app)

% Register the app with App Designer
registerApp(app, app.Zap31UIFigure)

if nargin == 0
clear app
end

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

27.03.04.2021. 203.03.167 ПЗ ВКР

Лист

89

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Южно – Уральский Государственный Университет. Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2008. – 56 с.
2. Теория матриц Ф.Р. Гантмахер
3. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов И.Н. Бронштейн К.А. Семендяев
4. Справочник по математике для научных работников и инженеров Г. Корн Т.Корн
5. Командно-измерительные приборы Б.И. Назаров С.А. Черников Г.А. Хлебников Г.В. Верхов
6. Индикаторные гироскопические платформы / Под редакцией
7. А.Д. Александрова. – Москва, Машиностроение, 1979. – 239с. (раздел 5)
8. Динамически настраиваемые гироскопы: Теория и конструкция / Д.С. Пельпор, В.А. Матвеев, В.Д. Арсеньев. – М., Машиностроение, 1988. – 264 с. (раздел 8.1)
9. <https://www.mathworks.com/help/matlab/>
10. Introduction to Applied Linear Algebra: Vectors, Matrices, and Least Squares. Stephen Boyd, Lieven Vandenberghe
11. Matlab в научных исследованиях. Н.Ю. Золотых. 2004 г.
12. <https://abc-import.ru/gps/1834-inercialnaja-navigacionnaja-sistema-obshhie-svedeniya-princip-dejstvija-klassifikacija-i-sposoby-orientacii/>
13. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>