

**СИСТЕМНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ,
КАЧЕСТВА, МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
И ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТАХ**

Коллективная монография

Под отв. редакцией
д.т.н., проф. НИУ ВШЭ Кофанова Ю.Н.

Москва

2014



Национальный исследовательский
университет «Высшая школа
экономики»



Научная школа «Асоника»

**СИСТЕМНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЁЖНОСТИ,
КАЧЕСТВА, МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И
ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТАХ**

Коллективная монография

Под отв. редакцией
д.т.н., проф. НИУ ВШЭ Кофанова Ю.Н.

Москва

2014

УДК 629.7.017.019.3
ББК 30.14
С82

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор А.Г. Варжапетян,
доктор технических наук, профессор Н.С. Данилин

С82 Системные проблемы надёжности, качества, математического моделирования и инфотелекоммуникационных технологий в инновационных проектах. / Коллективная монография под отв. ред. профессора НИУ ВШЭ Ю.Н. Кофанова; — М.: НИУ ВШЭ, 2014. — 532 с.— 500 экз.

ISBN 978-5-7598-1198-2.

Содержание монографии составили результаты многолетней работы членов коллектива Научной школы «Автоматизированная система обеспечения надёжности и качества аппаратуры АСОНИКА» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (научный руководитель школы — академик РАН, д.т.н., проф. Ю.Н. Кофанов) и многолетнего сотрудничества авторов, работы которых представлены в виде отдельных параграфов данной монографии. Окончательная структура монографии сформировалась в процессе обсуждения современных проблем надёжности, решаемых путём математического моделирования электронного оборудования различного назначения. Большую роль сыграли обсуждения данных проблем на ежегодных Международных научно-технических конференциях, проводимых Научной школой «АСОНИКА».

Главы 2 и 3 написаны редактором монографии профессором НИУ ВШЭ Кофановым Ю.Н.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области инфотелекоммуникационных технологий, реализуемых в инновационных проектах ответственного назначения.

УДК 629.7.017.019.3
ББК 30.14

ISBN 978-5-7598-1198-2

© Кофанов Ю.Н., 2014
© Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», 2014

Глава 1 СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

1.1. МИКРОМИНИАТЮРНЫЕ КОМПЛЕКТУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ СПУТНИКОВ

Сравнительный анализ динамики развития космической микроэлектроники в США, Японии, ЕС и Китая с одной стороны и России с другой, показывает перспективы развития отечественной электронной промышленности в таких приоритетных направлениях, как космическое приборостроение, атомная энергетика и высокоточные интеллектуальные системы вооружения.

Особенностью указанных продвинутых областей является большая номенклатура микроэлектронных компонентов (более 4600 типов) при малых количествах по каждой позиции (от 10 до 1000 штук в год). К этим компонентам предъявляются жесткие требования по радиационной стойкости (от 100 Крад до 1 Мрад) и надежности (до 20 лет безотказной работы).

Накопленный опыт отечественных разработчиков позволяет быстро с технической и экономической точки зрения решать подобную задачу, создавать изделия на мировом уровне с учетом миниатюризации, многофункциональности и минимального энергопотребления.

Ведущие мировые фирмы космического и оборонного сегментов уже около 20 лет используют в своих изделиях так называемые Системы в Корпусе (СвК) (System in Package), где на смену электронно-компонентной базе (ЭКБ) пришли микросистемы в корпусе.

Тем самым достигается миниатюризация изделия (вес, габариты), увеличивается его функциональность и снижается энергопотребление. При этом цикл «разработка – выпуск» сокращается до нескольких недель (программа «microsatellite in six days»).

В России сегодня есть 100% возможность разрабатывать и производить свои отечественные СвК.

В настоящей работе обсуждается концепция применения гибридных интегрированных систем в корпусе в качестве современной ЭКБ «макроуровня» для построения микроспутниковых систем на примере действующей в США практики с анализом сопутствующих проблем и экономических аспектов.

В течение последних десяти лет на мировом космическом рынке твердо установилась тенденция разработки и производства микроспутниковых систем (массой от 1 до нескольких десятков килограммов). В зависимости от массовой характеристики космического аппарата введена условная классификация – микро, нано и пико спутники. В настоящей работе, без нарушения общности, используется термин «микроспутник», поскольку речь идет о применении систем в корпусе для их реализации. Микроспутники стали весьма значимыми для потенциальных потребителей из-за их существенно редуцированной стоимости и значительно сокращенного цикла реализации. Одновременно во многих областях промышленности стали широко разрабатываться и применяться изделия микросистемотехники и субмикронных полупроводниковых технологий (МЭМС, системы на кристаллах и системы в корпусе). Это позволило реализовать множество миссий микроспутниковыми системами (в том числе и распределенными спутниковыми архитектурами) за счет традиционных решений, разработанных на основе классических спутниковых систем. На орбите появились целые микроспутниковые кластерные формации типа американской Ionospheric Observation Nanosatellite Formation (ION-F).

В работе рассматриваются концепции применения гибридных интегрированных систем в корпусе в качестве современной ЭКБ «макроуровня» для построения микроспутниковых систем на примере действующей в США практике с анализом сопутствующих проблем и экономических аспектов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1

Системный подход к проектированию изделий для ракетно-космической и авиационной техники

1.1. Микроминиатюрные комплектующие нового поколения для малых спутников.....	3
1.2. Обоснование закона формирования уводящих траекторий, не распознаваемых встроенной системой контроля целостности интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем.....	7
1.3. Методы и модели обнаружения и распознавания протяженных объектов на земной поверхности.....	13
1.4. Программно-информационная и методическая поддержка задач технического обслуживания и ремонта оборудования на основе системного подхода.....	26
1.5. Синтез стохастической модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы при движении объекта по ортодромии.....	31
1.6. Комплексное оценивание процесса технологической тренировки электронного устройства.....	41
1.7. Информационная система поддержки производства кольцевых лазеров.....	46
1.8. Лазерная интерферометрия для анализа сложных поверхностей.....	53
1.9. Влияние внешних источников рассеяния на полосу захвата кольцевого He-Ne лазера с длиной волны 0,63 мкм.....	61
1.10. Моделирование в САПР SYNOPSIS TCAD мощных биполярных транзисторов после облучения их быстрыми нейтронами.....	68

Глава 2

Моделирование физических процессов в конструкциях радиоэлектронных средств

2.1. Развитие моделирования физических процессов в радиоэлектронных конструкциях.....	81
2.2. Принципы моделирования физических процессов радиоэлектронных конструкций.....	82

Глава 3

Комплексное моделирование взаимосвязанных процессов разнородной физической природы

3.1. Особенности радиоэлектронных конструкций с точки зрения моделирования протекающих физических процессов.....	91
3.2. Метод комплексного моделирования физических процессов радиоэлектронных конструкций.....	97

Глава 4

Проблемы математического моделирования при обеспечении высокой надежности и качества бортовой аппаратуры

4.1. Повышение качества автоматизированного проектирования электронных средств на основе комплексирования физической и математических моделей.....	114
--	-----

4.2. Разработка электротепловых моделей радиоэлементов.....	120
4.3. Разработка методик и методов для моделирования тепловых процессов в радиоэлектронных средствах произвольной конструкции.....	127
4.4. Электротепловое моделирование радиотехнических устройств с помощью программы Micro-SAP.....	132
4.5. Опыт применения подсистемы АСОНИКА-Т при моделировании блока на тепловые воздействия.....	136
4.6. Математические модели и надежность радиоэлектронных средств при тепловых воздействиях.....	144
4.7. Метод автоматизированного синтеза параметров виброудароизоляции радиоэлектронных средств.....	154
4.8. Защита радиоэлектронных средств от механических воздействий высокой интенсивности.....	161
4.9. Применение безусловных неметрических критериев при разработке передачи винт-гайка скольжения.....	168
4.10. Математическое моделирование физических процессов при обеспечении надежности РЭА.....	176
4.11. Математическое и программное обеспечение квазичетырехчастотного лазерного гироскопа.....	185
4.12. Разработка метода проектирования радиотехнических устройств на основе итеративного моделирования взаимосвязанных электрических и тепловых режимов работы радиоэлементов.....	194

Глава 5

Проблемы анализа, оптимизации и принятия решений в сложных многокритериальных инновационных проектах

5.1. Многоальтернативный подход в задаче коррекции систем счисления пути по информации цифровых карт дорог.....	201
5.2. Многовариантный многокритериальный анализ и выбор механических приводов зеркальных антенн.....	203
5.3. Оптимизация упругих элементов датчиков лазерных гироскопов.....	214
5.4. Исследования и сравнительные испытания акселерометров в штатном инерциальном измерительном блоке.....	219
5.5. Инновационные результаты разработок в межрегиональном общественном учреждении «Институт инженерной физики» в области навигационного обеспечения наземных подвижных объектов.....	225
5.6. Оценка погрешностей вычисления координат бесплатформенными инерциальными навигационными системами.....	230
5.7. Статистический контроль процесса пайки в печатных платах.....	234
5.8. Надежность и долговечность биметаллических конструктивных элементов ядерной энергетики в условиях коррозионного воздействия.....	243
5.9. Оценка точности решения обратной задачи моделирования многомерных автокорреляционных характеристик надежности контактных наноструктурированных сверхпроводящих элементов.....	250
5.10. Оценка адекватности и достоверности математического моделирования многомерных автокорреляционных характеристик надежности контактных наноструктурированных сверхпроводящих элементов.....	263

5.11.	Возможности использования нечетко-нейронных технологий в задачах поддержки принятия решений в сложных технических системах.....	273
5.12.	Прогнозирование загруженности адаптивных систем с использованием самоорганизующейся инкрементальной нейронной сети	282
5.13.	Конечный автомат для измерения нечеткости	290
5.14.	Проблемы и приемы инфологического моделирования информационного взаимодействия автоматизированных систем.....	293
5.15.	Адаптивный логический вывод по прецедентам в системах поддержки принятия решений организационного управления	299

Глава 6

Экономические проблемы повышения эффективности инновационных проектов в различных областях деятельности

6.1.	Приоритетные направления развития региональных экономических систем в условиях финансового кризиса	301
6.2.	Формирование гармоничной инновационной стратегии предприятий в условиях сильной неопределенности на основе когнитивной технологии	307
6.3.	Роль программно-целевого подхода в обеспечении условий инновационного развития регионов	317
6.4.	Развитие инновационного потенциала малого и среднего предпринимательства через совершенствование государственной поддержки инфраструктуры	323
6.5.	Управление организационной готовностью к изменениям как фактор повышения успешности инновационных проектов	332
6.6.	Информационная система прогнозирования потребности рынка труда для развития региональных инновационных проектов	339
6.7.	Инвестиционные механизмы обеспечения устойчивого национального и регионального экономического роста	344
6.8.	Региональная промышленная политика как инструмент обеспечения экономической безопасности на мезоуровне	353
6.9.	Классификация регионов	362
6.10.	Роль электроэнергетической инфраструктуры в инновационном развитии	366
6.11.	Налоговое стимулирование инновационной деятельности	368
6.12.	Исследование динамики налоговых поступлений в центральном федеральном округе в 2006-2011 гг	373
6.13.	Анализ налоговых доходов субъектов РФ по видам экономической деятельности (на примере Приволжского федерального округа).....	377
6.14.	Инструменты управления инновационной составляющей экономики Ростовской области	385
6.15.	Проблематика инноваций в Ростовской области	390
6.16.	Совершенствование основных показателей инновационных проектов развития предприятий автомобилестроения России с учётом человеческого фактора	394
6.17.	Пути повышения инновационной активности в агропромышленном комплексе региона	399
6.18.	Прогнозирование как элемент регионального менеджмента	409
6.19.	Трансформация инновационных систем ведущих экономик мира	414
6.20.	Инновационные подходы в маркетинговой политике транснациональных корпораций	420

6.21.	Анализ и управление рисками ИТ-сервиса на всех стадиях его жизненного цикла	426
6.22.	Инновации на пути преодоления информационной асимметрии рынка гостиничных услуг в регионе	432
6.23.	Развитие и роль финансовой инженерии в банковской системе РФ	437
6.24.	Роль кредитного риска в снижении уровня участия коммерческих банков в инвестиционных программах	443
6.25.	Маркетинг на рынке ценных бумаг	448

Глава 7

Проблемы повышения качества подготовки молодых специалистов

7.1.	Государственная политика использования информационно-коммуникационных технологий в системе высшего профессионального и дополнительного образования	457
7.2.	Система менеджмента качества в вузе: проблемы внедрения и необходимость развития	463
7.3.	Повышение качества образования - важнейшая задача инновационного развития вузов.....	468
7.4.	Разработка методологии кадрового обеспечения инновационных проектов региона.....	474
7.5.	Формирование кадрового потенциала для обеспечения инновационного развития предприятий реального сектора экономики	482
7.6.	Анализ инструментов активизации продаж в сфере образовательных услуг	486
7.7.	Магистерская программа «Интеллектуальные лазерные навигационные системы» в МИЭМ НИУ ВШЭ – совместный проект высшей школы и отраслевого предприятия для подготовки нового поколения высококвалифицированных специалистов.....	496
7.8.	Элементы Форсайта в кадровом обеспечении региональных инвестиционных проектов.....	501
7.9.	Выбор стратегии функционирования вуза на основе мультиагентного моделирования системы высшего профессионального образования	506
7.10.	Семантическая модель представления знаний в системе вывода по прецедентам	508
7.11.	Построение интеллектуального интерфейса пользователя на основе моделирования интуиции	509
7.12.	Управление практико-ориентированным обучением в системах среднего и высшего образования.....	514

Коллективная монография

СИСТЕМНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЁЖНОСТИ, КАЧЕСТВА, МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНФОТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В
ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТАХ

*Под отв. редактированием
д.т.н. проф. НИУ ВШЭ Ю.Н. Кофанова*

Зав. редакцией Бережнова Е.А.

Литературный редактор *М.Б. Давыдова*
Технический редактор *А.Р. Абдулхаев*
Корректор *А.С. Яковлев*
Компьютерный набор *Д.С. Панасик*

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
101000, Москва, ул. Мясницкая, 20
Тел./факс: (499) 611-15-52

Изд. № 3. Сдано в набор 12.09.2014
Подписано в печать 28.09.2014. Формат 60×90 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать офсетная
Печ. л. 33,8. Тираж 500 экз.

Издательство НИУ ВШЭ

На основе анализа полученных результатов в АСОНИКЕ-ТМ были выявлены незначительные перегрузки на ПУ при воздействии гармонической вибрации. Максимальное значение ускорения при данном механическом воздействии составило – 40.707 g, что с учётом запаса надёжности 30% не соответствует требованиям ТУ, которые составляют 40g. В связи с этим, в конструкцию ПУ в данном проекте рекомендовано внести изменения, а именно использовать дополнительное ребро жесткости. При повторном расчете и анализе полученных результатов выяснилось, что печатный узел выдержал воздействие гармонической вибрации в заданном диапазоне. При остальных механических воздействиях значения ускорений так же соответствовали ТУ:

- максимальное значение ускорения при линейном ускорении – 4.892 g, что соответствует требованиям ТУ, которые составляют 150g;

- максимальное значение ускорения при ударах многократного действия – 15.996 g, что соответствует требованиям ТУ, которые составляют 500g;

Установка ребра жёсткости позволила получить большой запас прочности изделия и тем самым можно поставить вопрос о его облегчении путём уменьшения толщины стенок корпуса, т.к. он довольно массивен(толщина 7мм).

При проведении испытаний без использования ЭВМ трудно выявить отказы, которые возникают при эксплуатации РЭС под воздействием на них совокупности жёстких внешних факторов, которые действуют одновременно. Это объясняется отсутствием стендов, которые позволяли бы комплексно воспроизвести одновременно электрические процессы функционирования, сопутствующие тепловые, механические, аэродинамические, радиационные и другие внешние воздействия, технологические явления случайных разбросов параметров, старение, коррозию и другие деградиционные факторы. Проблема осложняется тем, что современные РЭС включают в себя сложные микроэлектронные изделия, обладающие определёнными физико-технологическими особенностями, которые также должны быть учтены при комплексном математическом моделировании. Все эти факторы и явления в совокупном взаимосвязанном своём проявлении обязательно должны быть правильно учтены при схемно-конструкторско-технологическом проектировании, что можно выполнить только с помощью ЭВМ.

4.11. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КВАЗИЧЕТЫРЕХЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

Эффективным методом компенсации магнитного дрейфа зеэмановских лазерных гироскопов (ЗЛГ) является так называемый «квазичетырехчастотный» режим генерации, а именно попеременная работа на продольных модах с противоположной круговой поляризацией. Переключение с одной моды генерации на другую осуществляется путем изменения периметра кольцевого лазера. При этом магнитная составляющая дрейфа меняет знак на противоположный и полностью компенсируется.

Поскольку мгновенная перестройка с одной продольной моды на другую невозможна, существует отрезок времени, в течение которого в лазере возникает режим большой разницы интенсивностей встречных волн, вплоть до возникновения однонаправленной генерации. При этом измеренная ЗЛГ угловая скорость содержит ложную составляющую, которая требует компенсации. Кроме того необходима компенсация оставшейся немагнитной составляющей дрейфа, а также температурных зависимостей масштабного коэффициента, матрицы ориентации.

Задачей настоящей работы является разработка оптимального математического и программного обеспечения управления периметром и компенсации ложной составляющей сигнала на выходе ЗЛГ исходя из условий работы ЗЛГ и собственных характеристик используемого лазера, а также алгоритмической компенсации имеющихся погрешностей.

Переключение мод зеемановского лазерного гироскопа. ЗЛГ представляет собой He-Ne лазер с неплоским контуром, образованным 4 диэлектрическими зеркалами. В таком лазере снимается вырождение с продольных мод с ортогональными круговыми поляризациями.

Для устранения влияния захвата частот встречных волн используется частотная подставка на базе эффекта Зеемана, создаваемая путем наложения на газоразрядные промежутки знакопеременного магнитного поля с периодом коммутации T (рис.1). Кроме того переключающееся поле приводит к модуляции интенсивности каждой из встречных волн. Амплитуда модуляции зависит от расстройки лазера от центра нерасщепленного магнитным полем контура усиления активной среды:

$$A_f = 4a_f \Delta\lambda \frac{c}{\Delta\nu}, \quad (1)$$

где $\Delta\nu$ – величина сдвига оптического контура за счет эффекта Зеемана, c – скорость света, a_f – константа, зависящая от усиления и потерь в резонаторе. Фаза модуляции (0 или π) зависит от направления круговой поляризации (правой или левой).

Таким образом, равенство нулю амплитуды данного сигнала означает точную настройку периметра на центр нерасщепленного магнитным полем контура усиления активной среды, что и поддерживает система регулировки периметра (СРП).

Частота подставки при этом равна:

$$f = f_0 (1 - \chi \Delta\lambda^2), \quad (2)$$

где f_0 и χ – константы, зависящие от усиления активной среды, уровня потерь в резонаторе, температуры активной среды, $\Delta\lambda$ – относительная расстройка периметра, выраженная в долях длины волны генерации лазера.

К СРП предъявляются следующие требования:

1. Обеспечение минимальной расстройки моды от центра кривой усиления.
2. Устойчивость при воздействиях механических ударов и вибраций, при повышенной и пониженной температурах окружающей среды.
3. Быстрое переключение лазера с моды с одним направлением круговой поляризации света на другую без появления колебательного режима.

Для системы авторегулирования, какой является и СРП, данные требования являются взаимоисключающими, поэтому необходим выбор их оптимального сочетания.

СРП можно разделить на две части: медленный каскад, состоящий из усилителя, синхронного детектора и интегратора и быстрый – транзисторный усилитель напряжения, нагруженный на пьезодвигатель подстройки периметра ЗЛГ. Поскольку входным сигналом для СРП является сигнал модуляции интенсивности света в одном из встречных лучей, прошедший через синхронный детектор, его частота равна удвоенной частоте коммутации подставки. Для обеспечения устойчивости системы авторегулирования необходимо, чтобы постоянная времени первого каскада составляла не менее 5 периодов входного сигнала T (периодов коммутации подставки). СРП имеет 2 входа. Первый из них – вход управления, отключающего вход транзисторного усилителя от выхода интегратора. В этом случае напряжение на пьезодвигателе определяется напряжением на втором входе СРП.

Состав прибора. В состав прибора входят:

- Три ЗЛГ и электронные блоки, служащие для переключения мод.
- Плата счетчиков для подсчета информационных импульсов. Имеет 6 счетчиков для подсчета импульсов с выходов трех ЗЛГ при вращении по и против часовой стрелке.
- Блок сбора данных (БСД), имеющий 16-разрядное АЦП с мультиплексором на 16 каналов, а так же 3-канальный 12-разрядный ЦАП, а также цифровые входы- выходы для чтения счетчиков и выработки управляющих сигналов.
- Вычислительный модуль (ВМ), в качестве которого используется ЭВМ типа Pentium 2, работающий под управлением ОС MS DOS.

- Плата обмена по стандарту MIL 1533.

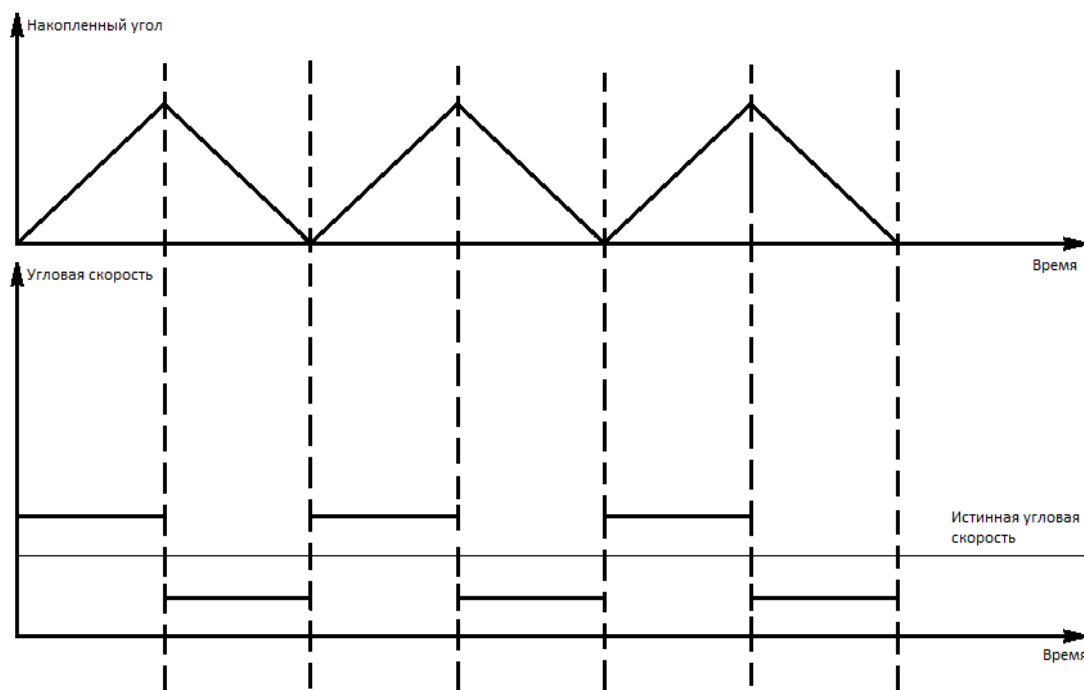


Рисунок 1 – Дрейф зеемановского лазерного гироскопа в квазичетырехчастотном режиме.

Структура программного обеспечения. Бортовая программа (БП) и файл паспортных констант (ФПК) записаны в долговременную память ВМ. Файл паспортных констант формируется на этапе технологических испытаний.

БП состоит из 4 блоков, функционально связанных между собой.

Функциональная схема БП приведена на рис. 2.

БП управляет чтением данных со всех датчиков прибора, контролирует включение/выключение СРП, а также каждые 2 минуты производит переключение рабочей моды. Такт работы прибора T задаётся периодом сигнала МУ, поступающего от ЗЛГ, и составляет 5 мс.

После прихода сигнала МУ БП считывает показания гироскопических датчиков (ГД), полученные за время предыдущего такта $P_{i,xyz}$, измеряет напряжение с выходов термодатчиков гироскопов $U_{TД,xyz}$ и сохраняет их в оперативной памяти ВМ.

После накопления первичных данных БП производит их обработку с использованием значений коэффициентов, записанных в ФПК.

В режиме предстартовой калибровки используется дополнительная математическая обработка данных.

Структурная схема одного такта съема информации приведена на рис. 3.

Основными режимами работы прибора являются:

- режим самодиагностики (функциональной готовности),
- режим предстартовой калибровки,
- режим передачи приращения углов на оси связанной системы координат с реверсом мод,
- режим ожидания команды.

Блок схема включения и выполнения режима самодиагностики представлена на (рис.4)

После подачи питания на прибор ВМ запускает бортовую программу, которая приступает к выполнению режима «Функциональная готовность». Выполнение режима

занимает 15 с и завершается выдачей донесения по каналу связи о состоянии прибора. Донесение состоит из следующих параметров:

- Наличие ФПК.
- Работоспособность ЛГ.
- Работоспособность термодатчиков.
- Корректность определения полуволнового напряжения $U_{\lambda/2}$.

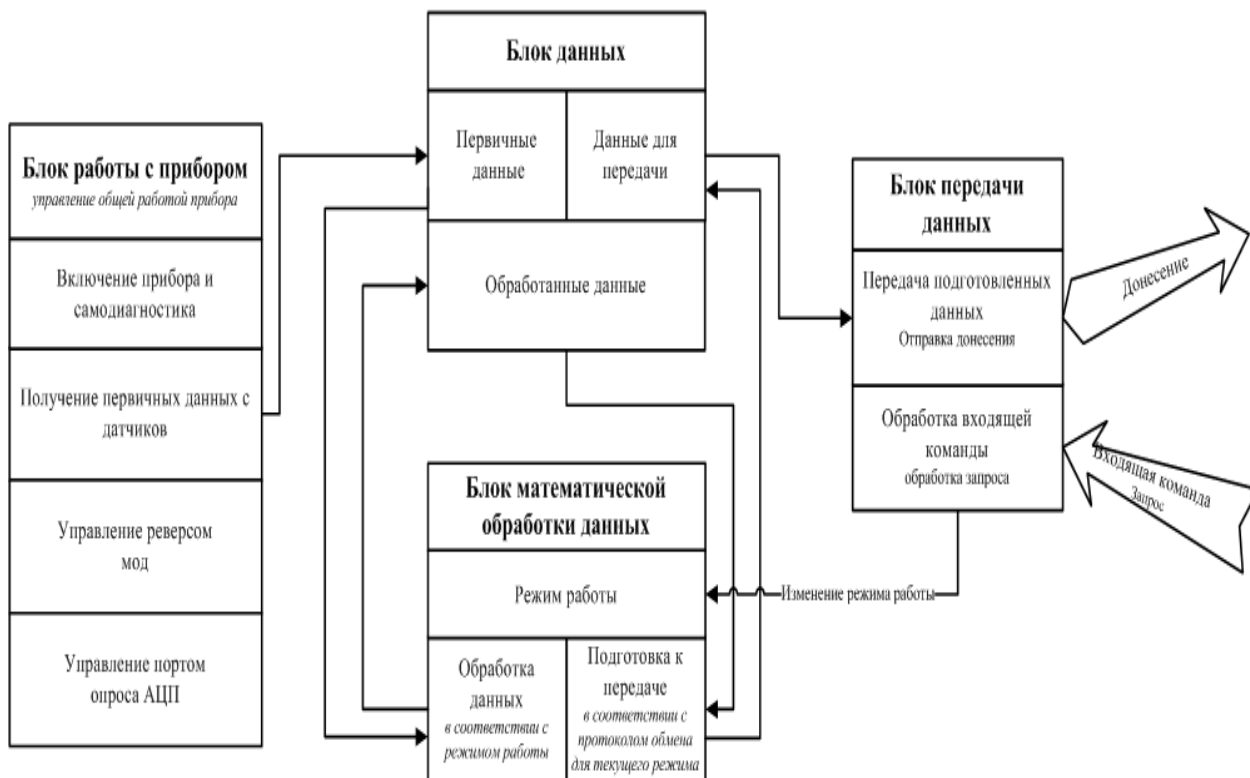


Рисунок 2 – Функциональная схема бортовой программы.

При получении команды на запуск предстартовой калибровки прибор должен находиться в состоянии покоя. В этом режиме производится коррекция постоянных составляющих полиномов температурных зависимостей магнитной и немагнитной составляющих дрейфа ГД. После получения команды БП накапливает данные, полученные с ГД, в течение 10 минут. За это время мода переключается 10 раз. Соответственно, время одного полупериода составляет одну минуту. Накопление данных происходит отдельно для каждой из мод. Блок схема приведена на рис. 5. По истечении времени калибровки БП производит следующий расчёт:

$$\Omega_{m,xyz} = \frac{\sum_{i=0}^{N_0} P_{imm0,xyz} + \sum_{k=0}^{N_1} P_{imm1,xyz}}{2(N_0 + N_1)\tau} \cdot K_{xyz}, \quad (3)$$

где $\Omega_{m,xyz}$ – измеренная угловая скорость без учёта дрейфа для m-й моды, N_0 – количество тактов съёма данных на моде 0, N_1 – количество тактов съёма данных на моде 1, K_{xyz} – масштабный коэффициент ГД.

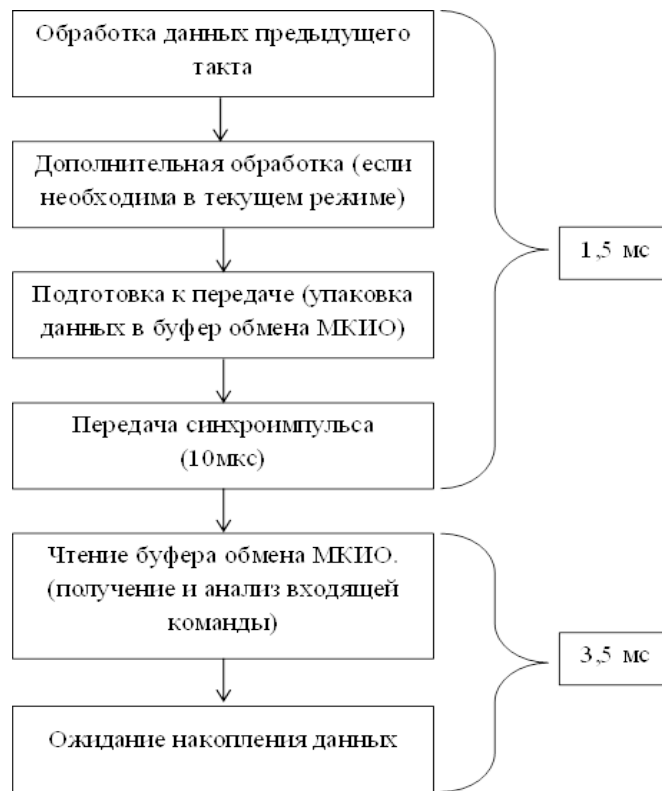


Рисунок 3 – Структурная схема одного такта съема информации



Рисунок 4 – Блок схема включения и выполнения режима самодиагностики

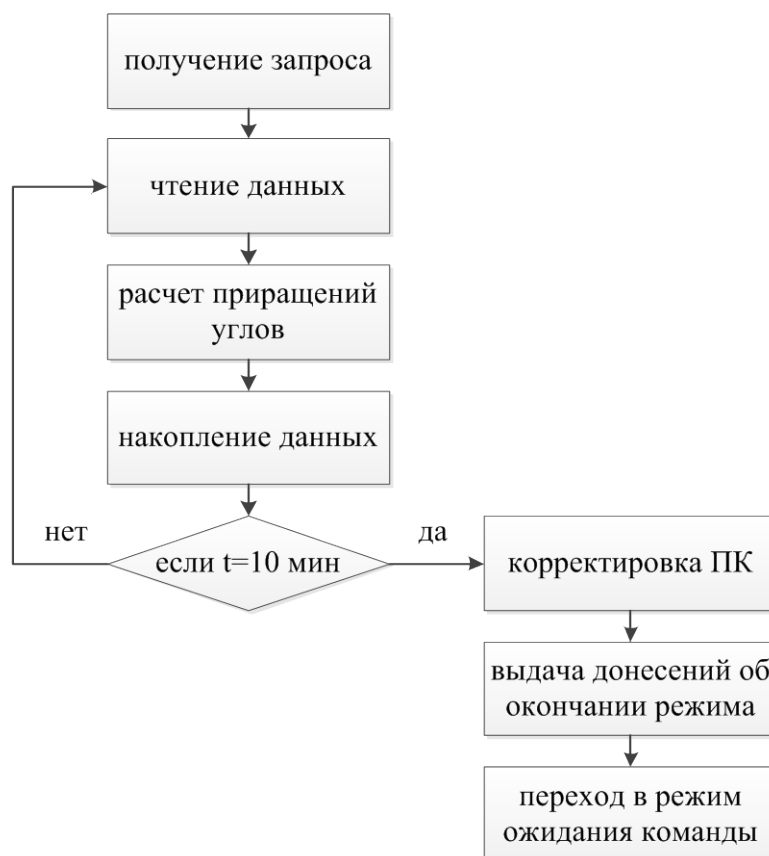


Рисунок 5 – Блок схема режима предстартовой калибровки

$$T_{0,xyz} = \frac{1}{N_0} \cdot \sum_{i=1}^{N_0} T_{i,xyz} ; \quad (4)$$

$$T_{1,xyz} = \frac{1}{N_1} \cdot \sum_{i=1}^{N_1} T_{i,xyz} , \quad (5)$$

где $T_{0,xyz}$ – средняя температура на моде 0, $T_{1,xyz}$ – средняя температура на моде 1.

Зная, что в покое показания ГД вычисляются по формуле:

$$\Omega_{изм,xyz} = \Omega_{з,xyz} + \Omega_{нм,xyz} \pm \Omega_{м,xyz} , \quad (6)$$

где $\Omega_{з,xyz}$ – проекция угловой скорости вращения Земли, $\Omega_{нм,xyz}$ – немагнитная составляющая дрейфа соответствующего ГД, $\Omega_{м,xyz}$ – магнитная составляющая дрейфа соответствующего ГД, знак выбирается в зависимости от рабочей моды.

$$[\Omega_3] = [cq][\omega_3] , \quad (7)$$

где $[cq]$ – матрица направляющих косинусов гироскопов, $[\omega_3]$ – проекция вращения Земли на приборные оси, $[\Omega_3]$ – проекция угловой скорости вращения Земли на оси чувствительности.

Очевидно, что

$$\Omega_{м,xyz} = \frac{\Omega_{0изм,xyz} - \Omega_{1изм,xyz}}{2} ; \quad (8)$$

$$\Omega_{нм,xyz} = \frac{\Omega_{0изм,xyz} + \Omega_{1изм,xyz}}{2} - \Omega_{з,xyz} ; \quad (9)$$

$$\Omega_{расчм,xyz} = \left[(B)_{0,xyz} \cdot (T_{0,xyz} - 25)^2 + B_{1,xyz} \cdot (T_{0,xyz} - 25) + B_{2,xyz} \right] \cdot \tau ; \quad (10)$$

$$\Delta\Omega_{м,xyz} = \Omega_{расчм,xyz} - \Omega_{м,xyz} . \quad (11)$$

Аналогично:

$$\Delta\Omega_{\text{нм},xyz} = \Omega_{\text{расчнм},xyz} - \Omega_{\text{нм},xyz}. \quad (12)$$

Далее БП вычисляет скорректированные значения постоянных членов полиномов температурных зависимостей магнитной и немагнитной составляющих дрейфа ГД:

$$B_{\text{корр2},xyz} = B_{2,xyz} + \Delta\Omega_{\text{м},xyz}; \quad (13)$$

$$C_{\text{корр2},xyz} = C_{2,xyz} + \Delta\Omega_{\text{нм},xyz}. \quad (14)$$

В дальнейшем БП для вычисления приращения углов использует скорректированные значения констант.

Режим передачи приращения углов на оси связанной системы координат с реверсом мод.

Блок-схема режима приведена на рис. 6.

Данный режим отличается от режима приращения углов без реверса мод тем, что каждые 2 минуты происходит перестройка периметра на другую рабочую моду. При этом происходит автоматическая компенсация магнитной составляющей дрейфа ГД.

Математическая обработка заключается в расчёте приращений углов на оси СВСК с учётом дрейфа ГД:

$$\Omega_{xyz} = K_{xyz} \cdot P_{xyz} - \Omega_{\text{нм},xyz} \pm \Omega_{\text{м},xyz} \pm \Omega_{\text{мм},xyz}, \quad (15)$$

где P_{xyz} – показания гироскопа в текущем такте.

Вычисление температуры ГД производится по следующей формуле:

$$T_{xyz} = A_{0,xyz} \cdot U_{\text{ТД},xyz} + A_{1,xyz}, \quad (16)$$

где $A_{0,xyz}$ и $A_{1,xyz}$ – коэффициенты зависимости температуры ГД от напряжения на выходе термодатчиков.

Магнитная составляющая дрейфа ГД вычисляется по формуле:

$$\Omega_{\text{м},xyz} = (B_{0,xyz} \cdot (T_{xyz} - 25)^2 + B_{1,xyz} \cdot (T_{xyz} - 25) + B_{2,xyz}) \cdot \tau, \quad (17)$$

где $B_{0,xyz}$, $B_{1,xyz}$, $B_{2,xyz}$ – коэффициенты полинома температурной зависимости.

Немагнитная составляющая дрейфа ГД вычисляется по формуле:

$$\Omega_{\text{нм},xyz} = (C_{0,xyz} \cdot (T_{xyz} - 25)^2 + C_{1,xyz} \cdot (T_{xyz} - 25) + C_{2,xyz}) \cdot \tau, \quad (18)$$

где $C_{0,xyz}$, $C_{1,xyz}$, $C_{2,xyz}$ – коэффициенты полинома температурной зависимости.

Вклад «медленного меандра» в измеряемую угловую скорость:

$$\Omega_{\text{мм},xyz} = D_{0,xyz}(T_{xyz} - 25) + D_{1,xyz}, \quad (19)$$

где $D_{0,xyz}$, $D_{1,xyz}$ – коэффициенты полинома температурной зависимости.

Режим ожидания команды.

Находясь в данном режиме, прибор не выполняет никакой математической обработки. Однако в текущем режиме происходит попеременная работа на двух модах. Это исключает вероятность того, что напряжение на пьезодвигателе окажется вне допустимого диапазона. Прибор также производит опрос всех датчиков. Обработку любой внешней команды прибор будет выполнять, только находясь в данном режиме.

Компенсация ложных показаний кольцевого лазера в процессе переключения мод генерации методом аппроксимирующей функции. При коммутации мод на участке выключения автоматической подстройки периметра имеет место пропадание двунаправленной генерации. Продолжительность этого процесса составляет 5...15 мс. Данные, получаемые с кольцевого лазера во время отсутствия двунаправленной генерации, не несут никакой полезной информации, поэтому необходимо в это время выдавать некие аппроксимированные данные, так как для интегрирования уравнений инерциальной навигации необходимо иметь непрерывную информацию. Самый простой подход – это

использовать для аппроксимации константу, рассчитанную как среднее значение показаний ЗЛГ за несколько тактов коммутации подставки до переключения.

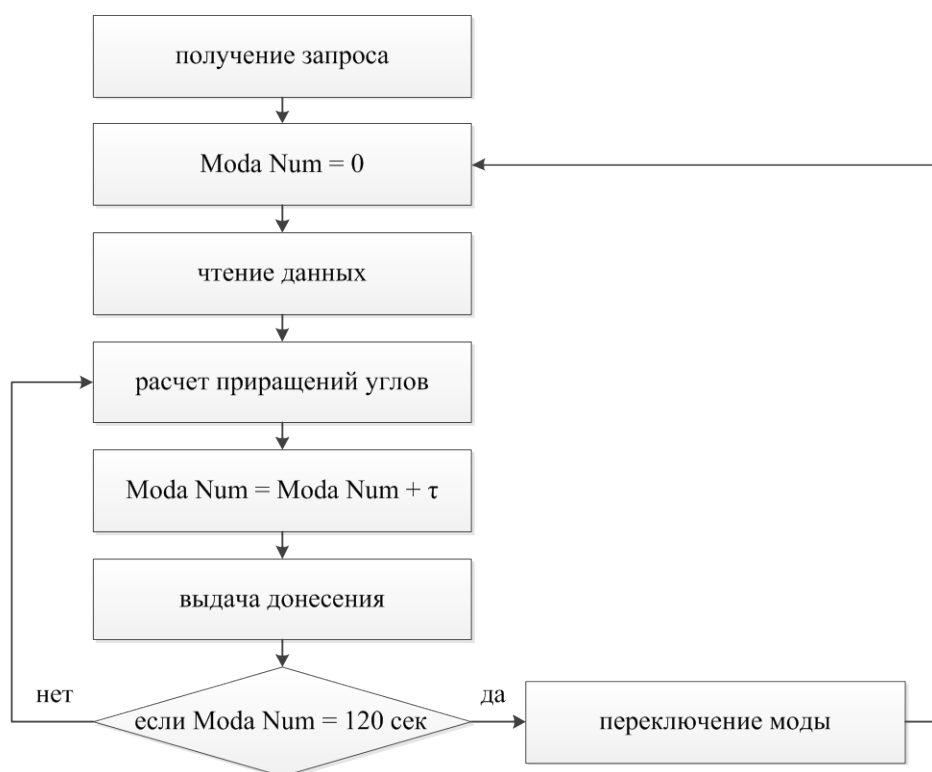


Рисунок 6 – Блок схема режима передачи приращения углов на оси связанной системы координат с реверсом мод

В реальной эксплуатации гироскоп вращается не только с постоянной угловой скоростью, но и угловым ускорением. Причем обычным явлением являются угловые колебания, т.е. переменное угловое ускорение. Таким образом, возникает выбор, полиномом какого порядка производить экстраполяцию. Интересны три основных варианта: подмена ложных показаний константой, аппроксимация прямой и аппроксимация параболой, рассчитанными по нескольким показаниям, предшествующим смене мод.

Очевидно, что более точное приближение будет, если использовать точки, прилегающие к переходному процессу с обеих сторон. Исходя из общих принципов аппроксимации, нами предлагается четырех шаговый алгоритм:

- до начала смены мод по нескольким точкам вычисляются коэффициенты аппроксимирующего полинома;
- во время смены мод данные выдаются на основе аппроксимации по точкам, полученным до начала процесса реверса;
- после завершения переходных процессов, возникающих при смене мод, делается более точная аппроксимация с использованием показаний до и после переключения;
- вычисляется расхождение между этими двумя аппроксимациями, которое вычитается из полученного в следующем такте значения.

В соответствии с теоремой Котельникова для точного описания аналогового процесса дискретным необходимо, чтобы период дискретизации был не менее, чем в 10 раз меньше периода самого процесса. Исходя из этого выбирается период коммутации подставки T , который одновременно является и периодом дискретизации. Отметим, что существенное уменьшение T затруднительно, поскольку увеличивает погрешность лазерного гироскопа в связи с возрастанием динамических зон синхронизации.

С выхода ЗЛГ каждый такт коммутации подставки считается приращение угла P_j , равное произведению угловой скорости вращения на период коммутации подставки T .

Для обеспечения непрерывности выдачи показаний во время первых 1...3 тактов коммутации подставки при смене мод используется экстраполирующая функция в виде константы, прямой или параболы:

$$P_{npj} = \begin{cases} A_0 \\ A_0 + A_1 t_j \\ A_0 + A_1 t_j + A_2 t_j^2 \end{cases}, \quad (20)$$

где P_{npj} - прогнозируемые показания гироскопа, $t_j = j \cdot T$, $j=1, 2, 3$ – номер такта коммутации подставки после сигнала на переключение моды. Коэффициенты A_0, A_1, A_2 определяются методом наименьших квадратов по четырём показаниям гироскопа P_j предшествующим переключению моды ($j=-3, -2, -1, 0$).

После установления генерации лазера на следующей моде, проводится новая аппроксимация с помощью функции

$$P_{kj} = \begin{cases} B_0 \\ B_0 + B_1 t_j \\ B_0 + B_1 t_j + B_2 t_j^2 \end{cases}. \quad (21)$$

Коэффициенты B_0, B_1, B_2 определяются также методом наименьших квадратов по четырём показаниям гироскопа P_j – двум до переключения моды и двум после включения автоматической подстройки периметра ($j=-1, 0, 4, 5$).

Поправка накопленного угла за время переключения мод ΔP определяется по формуле:

$$\Delta P = \sum_{j=1}^3 (P_{npj} - P_{kj}) \quad (22)$$

где P_{npj} – прогнозируемые показания ЗЛГ, вычисленные по формуле (20), P_{kj} - показания ЗЛГ, вычисленные по формуле (21).

Следующее показание ЗЛГ P_6 заменяется значением

$$\tilde{P}_6 = P_6 - \Delta P. \quad (23)$$

Ошибка при переключении мод δP при этом будет равна:

$$\delta P = \sum_{j=1}^3 (P_{kj} - P_{ист,j}) \quad (24)$$

где $P_{ист,j}$ – истинные значения показаний ЗЛГ при отсутствии переключения мод.

Такой метод подмены позволяет существенно уменьшить ошибку за такт переключения.

Компенсация динамического дрейфа зеемановского лазерного гироскопа при автоматической подстройке периметра после переключения мод. Первичный промах $\Delta \lambda_0$ при переключении определяется суммой ошибки измерения $U_{\lambda 2}$, дискрета ЦАП, гистерезиса пьезодвигателей. После включения автоматической подстройки СРП, расстройка периметра определяется формулой:

$$\Delta \lambda = \Delta \lambda_0 e^{-\frac{t}{\tau_{СРП}}}. \quad (25)$$

Поскольку частота подставки зависит от расстройки периметра, при уменьшении расстройки после включения автоматического регулирования частота подставки в положительных и отрицательных полупериодах подставки оказывается различной. Это приводит к возникновению кажущегося дрейфа. Кажущийся дрейф $\Delta \Omega_{СРП i}$ на i -м такте

коммутации подставки после включения автоматической подстройки периметра (начиная со второго такта):

$$\Delta\Omega_{СРП} = \Delta\lambda_o^2 \frac{f_o \tau_{СРП}}{2T} e^{-\frac{2(i-1)T}{\tau_{СРП}}} (e^{-\frac{T}{\tau_{СРП}}} - 1)^2; \quad e^{-\frac{2(i-1)T}{\tau_{СРП}}} = \frac{f_i - f_o}{f_1 - f_o};$$

$${}^{2(i-1)}\sqrt{\frac{f_i - f_o}{f_1 - f_o}} = e^{-\frac{T}{\tau_{СРП} i}} \quad f_o \Delta\lambda_o^2 \frac{\tau_{СРП}}{2} = \frac{f_1 - f_o}{e^{-\frac{2T}{\tau_{СРП}}} - 1}, \quad (26)$$

где f_o – частотная подставка при нулевой расстройке (рассчитывается по заранее измеренной температурной зависимости; $\Delta\lambda_o$ – амплитуда промаха при переключении мод; $\tau_{СРП}$ – постоянная времени системы автоматической регулировки периметра; f_i – измеренная частота подставки на i -м такте коммутации подставки после включения автоматической регулировки периметра; f_1 – измеренная частота подставки на 1-м такте коммутации подставки после включения автоматической регулировки периметра; T – период коммутации частотной подставки.

Для обеспечения работы метода при угловых скоростях угловых скоростях, близких и превышающих амплитуду частотной подставки, измерение f_i следует производить отдельно в положительном f_i^+ и отрицательном f_i^- полупериодах i -го такта коммутации подставки с учетом знака направления вращения. При этом $f_i = (f_i^+ - f_i^-)/2$.

Разработанное математическое и программное обеспечение зеемановского лазерного гироскопа позволило повысить точность выпускаемых приборов без ограничения их динамических характеристик примерно в 10 раз. При этом были разработаны новые методы компенсации кажущегося дрейфа при переключении мод и температурной коррекции смещения нуля.

4.12. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ИТЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОЗАВИСИМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ

При проектировании высоконадежных РТУ сложность заключается в том, чтобы учесть сразу несколько одновременно действующих внешних воздействующих факторов. При эксплуатации, отказы РТУ из-за тепловых воздействий связаны с большим их влиянием на работу ЭРЭ, а, следовательно, на электрические характеристики сигналов, особенно в теплонагруженных приборах. Для исследования и решения подобных сложных, комплексных проблем создаются математические модели, описывающие внутреннее строение блоков аппаратуры, ее параметры, режимы работы элементов, конструкцию. На основе совокупной информации о компонентах РТУ и технического задания, по этим моделям проводится расчет параметров режимов работы, просчитывается конструкция. Однако, на практике, существуют факторы, ограничивающие объем исследований схемно-конструктивных решений с использованием математического моделирования, среди них можно выделить следующие:

- моделирование сводится к проверке готовых схемно-конструктивных решений;
- отсутствие итерационного обмена данными между математическими моделями различных иерархических уровней, что позволило бы снизить погрешности моделирования;
- недостаточная адекватность моделей, нарушающаяся при изменении режимов работы изделий, параметров схемы и/или конструкции в процессе проектирования;
- высокая вероятность возникновения ошибок в модели при изменении небольшого числа параметров конструктивно сложного устройства;
- всестороннее комплексное исследование схемно-конструктивных решений сложного устройства проводится с применением нескольких систем автоматизированного