

**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 базы (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, параболотанных 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 практики с анализом сопутствующих проблем и экономических аспектов.

СПИСОК АВТОРОВ

Авторы параграфа	№ параграфа
Абелян А. С.	6.7.
Агирова З.М.	6.24.
Азарова В.В.	1.9.
Акперов И.Г.	6.6.
Аликаева М.В.	6.24.
Алпеева Т.В.	5.9., 5.10.
Батуев В.П.	4.8.
Баублис Б.П.	7.1.
Белов А.В.	7.7.
Беляков К.И.	4.5.
Бердник В.Л.	7.11.
Береза Б.П.	5.8.
Беркович С.Б.	1.2., 5.1., 5.5.
Брюханова Н.В.	6.6., 7.4.
Булаев И.	1.1.
Бурдаев А.И.	4.7.
Бутягин О.Ф.	5.3.
Васильчиков В.М.	7.1.
Васин В.А.	6.16.
Вахитов Н.Г.	5.6.
Ветчинкин А.Н.	6.10.
Голяев Ю.Д.	4.11., 5.3., 5.4., 5.6.
Голяева А. Ю.	1.8.
Горшков В.Н.	1.9.
Данилин Н.С.	1.1.
Дейнекин И.А.	6.15.
Димитров Д.	1.1.
Емельянов В.В.	5.9., 5.10.
Емельянов В.М.	5.9., 5.10.
Ероян А.Е.	7.6.
Жуковская И.Ф.	7.2.
Звягинцева О.П.	7.2.
Зорин С.А.	4.10.
Иванов М.А.	4.11., 5.6.
Иванус А.И.	6.2.
Исаев М.М.	4.12.
Исаева Е.А.	7.8.
Камалетдинов А.Ш.	6.12., 6.13.
Кандырин Ю.В.	4.9., 5.2.
Кауунников А.А.	5.9., 5.10.
Карпова С.В.	6.20.
Касаев Б.С.	6.25.
Квасков А.Ю.	7.10.
Кетова Ф.Р.	6.22.
Кизим А.В.	1.4.

Авторы параграфа	№ параграфа
Киселева Т.В.	6.21.
Киселевич В.П.	1.6., 5.7.
Кинова Л.Д.	6.9., 6.17.
Клячкин В.Н.	1.6., 5.7.
Колбас Ю.Ю.	4.11., 5.4., 5.6.
Коновалов С.Ф.	5.4.
Косарев И.М.	6.12., 6.13.
Котов Н.И.	1.2., 5.1., 5.5.
Кофанов Ю.Н.	2.1., 2.2., 3.1., 3.2., 4.6.
Коханова В.С.	6.23.
Кравец А.Г.	7.12.
Крамаров С. О.	1.3., 1.5., 5.15.
Краснопахтич М.В.	6.3.
Кривонос К.К.	6.14.
Кроваткин М.В.	5.3.
Крутиков А.П.	4.11.
Ксенофонт А.А.	6.12., 6.13.
Ксенофонт А.С.	6.24.
Куликов О.Е.	4.3.
Куприянов А.А.	5.14.
Курдыбанская А.И.	5.6.
Кшеский О.Н.	1.10.
Леонтьева А.В.	7.9.
Литвиненко И.Л.	6.19.
Литвинова Т. И.	6.18.
Лобанов П.Ю.	1.8.
Лукасевич В.И.	1.5.
Малов А.В.	4.3.
Манохин А.И.	4.6.
Мануйлович И.С.	1.8.
Маслова Е.В.	6.21.
Махаев А.Ю.	1.2.
Миронова О.А.	6.8.
Моисеев А.А.	5.9., 5.10.
Мусаелин А.К.	6.11.
Невелев В.А.	6.16.
Новиков С.С.	1.7.
Палагина А.Н.	6.4.
Петрухин Е.А.	1.9.
Пимнева Л.А.	5.9., 5.10.
Потапова Т.А.	1.7.
Поляков В.Н.	1.10.
Прусаков М.И.	4.2., 4.4.
Пухлий В.А.	5.8.
Сабиров И.	1.1.

Савельев И.И.	1.7., 5.3.
Садеков Р.Н.	5.1.
Светашев С.С.	7.8.
Семененко А.Н.	4.3., 4.5.
Сергисенко Л.С.	7.5.
Сидорюк О. Е.	1.8.
Скопин К.А.	5.3.
Слободин В.С.	5.12.
Смирнов Д.В.	5.5.
Соловьёва Т.И.	4.11., 5.4., 5.6., 7.7.
Сотникова С.Ю.	4.1.
Стефанюк В.Л.	5.13.
Темкин И.О.	7.9.
Терентьева А.В.	5.11.
Титова О.В.	7.12.
Ткачук Е. О.	5.15.
Томилин А.В.	5.4.
Туманова И.Ю.	6.1.
Туник С.И.	5.7.
Турип В.О.	1.10.
Форост Е.В.	6.9.
Халитова И. В.	6.5.
Хлебников П.А.	1.7.
Храмов В.В.	1.3.
Чвишев А.Д.	4.9., 5.2.
Чикарина Л.Я.	7.1.
Шалумов М.А.	4.3.
Шелков Е.А.	4.8.
Шуклин И.И.	5.9., 5.10.
Ястребов А.П.	7.3.
Ястребова Л.В.	7.3.

[illegible]

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 АСНИКА-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 взаимозависимых 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

- программно-математический комплекс обработки сигналов ПЗС-матрицы, обеспечивающий высокоточное определение энергетических центров изображений с последующим измерением углов между ними.

Особенности применения АСОА по назначению: размещение АВ на специальном фундаменте, ориентированном в направлении истинного меридиана; обеспечение видимости Полярной звезды через астроиллюминатор (высота от пола до АИ не более **4 м**).

Стенд поверок геодезических средств оборудуется универсальным коллиматорным стендом VEGA-УКС, установкой эталонирования гравиметров и стендом поверки геодезической спутниковой аппаратуры.

На геодезическом полигоне специальной сетью ориентирных пунктов и промежуточных знаков создаются рабочие места по поверкам дальномеров и нивелиров.

Инновационные разработки МОУ «ИИФ» в области навигационного обеспечения подвижных наземных объектов позволили создать качественно новый тип интегрированных инерциально-геоинформационных систем, которые без потери свойства автономности исключают нарастание погрешностей. Автоматическая система определения астрономического азимута, имеющая уникальные точностные характеристики обеспечивает создание метрологических комплексов поверок и калибровок самых высокоточных приборов автономного азимутального ориентирования.

5.6. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫЧИСЛЕНИЯ КООРДИНАТ БЕСПЛАТФОРМЕННЫМИ ИНЕРЦИАЛЬНЫМИ НАВИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

Проведение исследований погрешностей определения координат бесплатформенными инерциальными навигационными системами (БИНС), используемыми для управления движением объекта по заданной траектории, необходимо для каждого конкретного практического применения системы с тем или иным комплектом датчиков. При этом ставится задача получить соотношения, позволяющие сформулировать реальные требования к точности конструктивной привязки и инструментальным погрешностям датчиков инерциального измерительного блока (ИИБ), обеспечивающие заданную точность управления движением объекта.

При разработке программно-математического обеспечения (ПМО) БИНС объект отождествляется с ортогональной декартовой системой координат, жестко связанной с объектом (СВСК). В конструктивном исполнении такая система координат может быть реализована, например, нормальными к граням куба, выполненного с высокой точностью и жестко связанного с ИИБ, состоящим из трех лазерных гироскопов (ЛГ) и трех маятниковых акселерометров (МА).

В используемых в ПМО БИНС алгоритмах интегрирования уравнений инерциальной навигации предполагается, что входная информация, поступающая от датчиков ИИБ, задана на ортогональных осях СВСК. Технология изготовления ИИБ не позволяет, однако, изначально выставить измерительные оси датчиков ЛГ и МА параллельно одноименным осям СВСК с требуемой точностью. В связи с этим возникает необходимость измерения этих углов, называемых углами конструктивной привязки, на этапе паспортизации ИИБ (см. рис. 1).

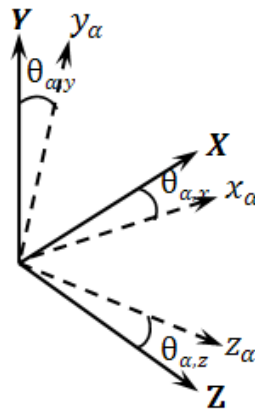


Рисунок 1 – X, Y, Z – оси СВСК, $x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha$ – измерительные оси датчиков ЛГ ($\alpha = q$) или МА ($\alpha = a$), $\theta_{\alpha, x, y, z}$ – углы конструктивной привязки

Исследования показали, что погрешности определения углов конструктивной привязки и смещений нулей МА являются определяющими факторами уходов координат от заданной траектории движения.

Описание траектории движения. В работе рассматривается упрощенный частный случай, когда объект движется по вертикали до верхней точки и опускается вниз. Это позволяет существенно упростить математические вычисления, не снижая общности полученных оценок.

Для получения оценочных соотношений рассмотрены только три временных интервала движения, в течение которых происходят, главным образом, накопления ошибочных скоростей: этап установления начальной ориентации объекта; этап разгона; этап движения по инерции.

Начало отсчета времени соответствует началу интегрирования уравнений навигации. В интервале $0 \leq t \leq 15 \text{ с}$ осуществляется выставка начальной ориентации объекта.

В дальнейших расчетах принято, что начальная выставка состоит в переводе СВСК из позиции «0» в позицию «1» (см. рис. 2). Перевод осуществляется поворотом вокруг оси Z на угол $\varphi = \pi/2$ с постоянной угловой скоростью $\omega_z = \pi/2T_{но}$, где $T_{но} = 15 \text{ с}$ (см.рис. 2).



Рисунок 2 – Начальная выставка: (а) – позиция «0»; (б) – позиция «1»; $\varphi = \omega_z \cdot t$

В интервале $15 \text{ с} < t \leq 40 \text{ с}$ объект движется с кажущимся ускорением $\bar{G}_r = N \cdot \bar{G}$, направленным вдоль оси X, в течение времени $T_{ак} = 25 \text{ с}$, где N – целое число в интервале $5 \leq N \leq 10$, $\bar{G}$ – вектор ускорения силы тяжести Земли.

В интервале $t > 40 \text{ с}$ движение происходит по инерции в поле земного тяготения. Сопротивление воздуха в расчетах не учитывается.

Время полета $T_{пол}$ определяется соотношениями

$$T_{пол} = T_{под} + T_{сп}, \quad (1)$$

где

$$T_{под} = T_{ак} + \frac{G_r T_{ак}}{G};$$

$$T_{сп} = \sqrt{\frac{2H_{max}}{G}};$$

$$H_{max} = \frac{T_{ак}^2 G_r}{2} \left(1 + \frac{G_r}{G}\right),$$

H_{max} – максимальная высота подъема.

Источники погрешности. При пересчете показаний датчиков ЛГ и МА с измерительных осей на оси СВСК возникают погрешности, связанные с погрешностями конструктивной привязки и инструментальными погрешностями ЛГ и МА.

При пересчете проекций показаний акселерометров с осей СВСК на оси сопровождающей системы координат (СОСК), в которой осуществляется интегрирование уравнений навигации, возникают дополнительные погрешности, связанные с погрешностью определения параметров ориентации (α , β , A) СВСК относительно СОСК.

В результате этих погрешностей в конце разгонного участка на осях СОСК возникают погрешности проекций скорости, приводящие при дальнейшем интегрировании уравнений навигации к накапливающимся погрешностям определения угловых и линейных координат.

Математическая постановка задачи. Вектор погрешности ускорения определяется соотношением

$$\overline{\Delta a} = [\Delta c a_{ij}] \cdot [d_{ij}] \cdot [\Delta d_{ij}] \cdot \bar{G}; \quad i = 1, 2, 3; \quad j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где $\overline{\Delta a} = [\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z]^T$ – вектор погрешности ускорения;

$[\Delta c a_{ij}]$ – матрица погрешности конструктивной привязки измерительных осей МА к осям СВСК;

$[d_{ij}]$ – матрица ориентации СВСК относительно СОСК, вычисляемая по показаниям датчиков ЛГ при переводе системы из позиции «0» в позицию «1» (см. рис. 2а), при этом

$$[d_{ij}] = \begin{vmatrix} \cos \varphi_{изм} & \sin \varphi_{изм} & \Delta c q_{23} \sin \varphi_{изм} \\ -\sin \varphi_{изм} & \cos \varphi_{изм} & -\Delta c q_{13} \sin \varphi_{изм} \\ -\Delta c q_{23} \sin \varphi_{изм} & \Delta c q_{13} \sin \varphi_{изм} & 1 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

$$\varphi_{изм} = \varphi(1 + \Delta k_z), \quad \varphi = \omega_z t, \quad (4)$$

Δk_z – относительная погрешность масштабного коэффициента по оси Z;

$[\Delta c q_{ij}]$ – матрица погрешности конструктивной привязки измерительных осей ЛГ к осям СВСК;

$[\Delta d_{ij}]$ – матрица погрешности начальных значений параметров ориентации α , β , A СВСК относительно СОСК, определяемая как

$$[\Delta d_{ij}] = \begin{vmatrix} 1 & \Delta \beta & \Delta A_z \\ -\Delta \beta & 1 & \Delta \alpha \\ -\Delta A_z & -\Delta \alpha & 1 \end{vmatrix}; \quad (5)$$

$\bar{G} = [0, \quad G, \quad 0]^T$ – вектор ускорения силы тяжести Земли, заданный проекциями на оси СОСК.

В соотношении (3), в целях упрощения записи, из инструментальных погрешностей ЛГ учтены только погрешности конструктивной привязки и масштабного коэффициента k_z . Смещения нулей ЛГ и другие погрешности малы по сравнению с учтенными более чем на порядок.

Начальная выставка параметров α и β осуществляется с помощью акселерометров. В соответствии с этой методикой погрешности $\Delta \alpha$ и $\Delta \beta$ определяются соотношениями

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta sa_z}{G} + \Delta ca_{32}; \quad \Delta \beta = \frac{\Delta sa_x}{G} + \Delta ca_{12}, \quad (6)$$

где $\Delta sa_{x,z}$ – остаточные смещения нулей акселерометров по каналам x_a и z_a соответственно.

Расписав уравнение (2) в скалярной форме, получаем

$$\Delta a_x = (\Delta ca_{11} (\Delta \beta \cdot \cos \varphi_{u3M} + \sin \varphi_{u3M} - \Delta \alpha \cdot \Delta cq_{23} \cdot \sin \varphi_{u3M}) + \Delta ca_{12} (-\Delta \beta \cdot \sin \varphi_{u3M} + \cos \varphi_{u3M} + \Delta \alpha \cdot \Delta cq_{13} \cdot \sin \varphi_{u3M}) + \Delta ca_{13} (-\Delta \beta \cdot \Delta cq_{23} \cdot \sin \varphi_{u3M} + \Delta cq_{13} \cdot \sin \varphi_{u3M} - \Delta \alpha)) G_m; \quad (7)$$

$$\Delta a_y = (\Delta ca_{21} (\Delta \beta \cdot \cos \varphi_{u3M} + \sin \varphi_{u3M} - \Delta \alpha \cdot \Delta cq_{23} \cdot \sin \varphi_{u3M}) + \Delta ca_{22} (-\Delta \beta \cdot \sin \varphi_{u3M} + \cos \varphi_{u3M} + \Delta \alpha \cdot \Delta cq_{13} \cdot \sin \varphi_{u3M}) + \Delta ca_{23} (-\Delta \beta \cdot \Delta cq_{23} \cdot \sin \varphi_{u3M} + \Delta cq_{13} \cdot \sin \varphi_{u3M} - \Delta \alpha)) G_m; \quad (8)$$

$$\Delta a_z = (\Delta ca_{31} (\Delta \beta \cdot \cos \varphi_{u3M} + \sin \varphi_{u3M} - \Delta \alpha \cdot \Delta cq_{23} \cdot \sin \varphi_{u3M}) + \Delta ca_{32} (-\Delta \beta \cdot \sin \varphi_{u3M} + \cos \varphi_{u3M} + \Delta \alpha \cdot \Delta cq_{13} \cdot \sin \varphi_{u3M}) + \Delta ca_{33} (-\Delta \beta \cdot \Delta cq_{23} \cdot \sin \varphi_{u3M} + \Delta cq_{13} \cdot \sin \varphi_{u3M} - \Delta \alpha)) G_m, \quad (9)$$

где $G_m = \begin{cases} G & \text{при } 0 \text{ с} < t < 15 \text{ с} \\ G_r & \text{при } 15 \text{ с} < t < 40 \text{ с}. \end{cases}$

При $\varphi = \pi/2$ из соотношений (7) – (9) в линейном приближении относительно величин Δca_{ij} , Δcq_{ij} , $\Delta \alpha$, $\Delta \beta$, Δk_z получаем

$$\Delta a_y = (\Delta ca_{21} - \Delta ca_{12} + \pi/2 \cdot \Delta k_z - \frac{\Delta sa_x}{G}) G_r; \quad (10)$$

$$\Delta a_z = (\Delta ca_{31} + \Delta cq_{13} - \Delta ca_{32} - \frac{\Delta sa_z}{G}) G_r. \quad (11)$$

Погрешности скоростей в конце разгонного участка определяются из (10) и (11) формулами

$$\Delta V_y = \Delta a_y T_{ак}; \quad \Delta V_z = \Delta a_z T_{ак}. \quad (12)$$

К концу полета погрешности координат l_y и l_z из (10) – (12) определяются соотношениями

$$l_y = (\Delta a_y + \Delta sa_y) \frac{T_{ак}^2}{2} + \frac{\Delta sa_y T_{пол}^2}{2} + \Delta V_y T_{пол}; \quad (13)$$

$$l_z = (\Delta a_z + \Delta sa_z) \frac{T_{ак}^2}{2} + \frac{\Delta sa_z T_{пол}^2}{2} + \Delta V_z T_{пол}.$$

В расчетах принято, что величины Δca_{ij} , Δcq_{ij} , $\Delta sa_{x,y,z}$, Δk_z являются случайными величинами, распределенными по нормальному закону, и задаются статистическими параметрами Mo – математическое ожидание и σ – среднеквадратичное отклонение.

Результаты расчетов для l_z и l_y представлены в таблицах А и В соответственно, где приняты следующие обозначения:

$Mo_{\Delta ca} = Mo_{\Delta cq}$ – математические ожидания величин Δca_{ij} , Δcq_{ij} , одинаковые для всех значений индексов i, j ;

$\sigma_{\Delta ca} = \sigma_{\Delta cq}$ – среднеквадратичные отклонения этих величин;

$Mo_{\Delta sa}$ – математические ожидания смещений нулей $\Delta sa_{x,y,z}$;

$\sigma_{\Delta sa}$ – среднеквадратичные отклонения этих величин;

$Mo_{\Delta k_z}$ – математическое ожидание погрешности Δk_z ;

$\sigma_{\Delta k_z}$ – среднеквадратичное отклонение этой величины;

$Mo_{l_{y,z}}$ – математические ожидания погрешностей координат l_y и l_z ;

$\sigma_{l_{y,z}}$ – среднеквадратичные отклонения этих величин.

Таблица А

№	$Mo_{\Delta ca}$ (рад)	$\sigma_{\Delta ca}$ (рад)	$Mo_{\Delta sa}$ (м/с ²)	$\sigma_{\Delta sa}$ (м/с ²)	N	$T_{ак}$ (с)	$T_{пол}$ (с)	Mo_{I_z} (м)	σ_{I_z} (м)
1	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	5	25	321	415	261
2	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	6	25	377	581	364
3	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	10	25	602	1522	953
4	$5 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$	0	$8 \cdot 10^{-4}$	6	25	377	97	135
Ошибка при списании V_z по окончании $T_{ак}$							377	0	56

Таблица В

№	$Mo_{\Delta ca}$ (рад)	$\sigma_{\Delta ca}$ (рад)	$Mo_{\Delta k}$	$\sigma_{\Delta k}$	$Mo_{\Delta sa}$ (м/с ²)	$\sigma_{\Delta sa}$ (м/с ²)	N	$T_{ак}$ (с)	$T_{пол}$ (с)	Mo_{I_y} (м)	σ_{I_y} (м)
1	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0	$5 \cdot 10^{-5}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	5	25	321	276	224
2	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0	$5 \cdot 10^{-5}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	6	25	377	387	313
3	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0	$5 \cdot 10^{-5}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	10	25	602	1015	817
4	$5 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$	0	$5 \cdot 10^{-5}$	0	$8 \cdot 10^{-4}$	6	25	377	65	129
Ошибка при списании V_y по окончании $T_{ак}$									377	0	56
5	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0	$2 \cdot 10^{-5}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	5	25	321	276	221
6	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0	$2 \cdot 10^{-5}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	6	25	377	387	310
7	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0	$2 \cdot 10^{-5}$	0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	10	25	602	1015	808
8	$5 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$	0	$2 \cdot 10^{-5}$	0	$8 \cdot 10^{-5}$	6	25	377	65	120
Ошибка при списании V_y по окончании $T_{ак}$									377	0	56

Как следует из полученных результатов, ошибка определения координат практически не зависит от дрейфов гироскопов. Основной вклад в отклонение координат вносят ошибки конструктивной привязки, смещения нулей акселерометров и погрешности масштабных коэффициентов гироскопов. Следствием погрешностей является возникновение кажущихся боковых линейных скоростей по окончании разгонного участка, в результате которых возникает ошибочный уход соответствующих координат от заданной траектории в течение полета. Списание этих скоростей по сигналам внешних источников информации, например GPS или ГЛОНАСС, позволяет в несколько раз повысить точность определения координат по сравнению с полностью инерциальным режимом.

5.7. СТАТИСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ПАЙКИ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

Обеспечение качества паяных соединений в печатных платах при производстве радиоэлектронной продукции в значительной мере связано с обеспечением соблюдения заданной температурно-временной характеристики (термопрофиля) в зоне пайки, пример который приведен ниже на рис. 1.

Планирование термопрофиля осуществляется на основании данных о типах паяемых компонентов, паяльной пасты, количестве зон нагрева, и т. д. В первую очередь контролируется максимальная температура плавления и время выдержки при этой температуре. На эти параметры задаются допуски, обеспечение которых - один из важнейших факторов качества паяного соединения.

Опытный технолог знает, что разная номенклатура компонентов на одном и том же типе печатной платы требует подстройки термопрофиля пайки. Особенно это актуально для многономенклатурных производств, где выпускаются изделия с широким спектром типов элементов в различных корпусах.

Заметим, что современные индукционные паяльные станции поверхностного монтажа имеют до 7 зон в туннеле прохождения печатной платы под монтаж. Отсюда имеется