

**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, 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

Для проведения испытаний датчики закреплялись на внутренней грани испытательного куба, который устанавливается либо на платформе ударного стенда, либо вибростенда. При испытании на виброустойчивость проводился контроль амплитуд ускорения платформы, испытательного куба, прижима и резонатора датчика с помощью тензодатчиков, установленных на них. Выявлено наличие собственных колебаний платформы, посадочного места испытательного куба, посадочного места датчика на кубе, при этом амплитуда ускорения вибрационных колебаний возрастала в несколько раз относительно заданной. Области вибрационных нагрузок с собственными частотами платформы и испытательного куба были исключены из рассмотрения диапазона виброустойчивости датчиков.

В результате испытаний на удароустойчивость было установлено, что в диапазоне амплитуд ускорений (10–80) g с длительностью (0,5–20) мс и 100 g с длительностью (1–5) мс все датчики устойчивы к ударам. Датчик ЗЛК-20Э устойчив к ударам с амплитудой ускорения не более 30 g.

При испытаниях на вибрацию устойчивость в диапазоне (20–2000) Гц с амплитудой ускорения (5–10) g и скоростью изменения частоты (2,5–3) октава/мин электрический контакт сохраняется во всех датчиках. При скорости изменения частоты, равной 1 октава/мин в том же диапазоне частот и амплитуд ускорения, электрический контакт сохранялся в датчиках ЗЛК-16 и ЗЛК-20 и нарушался в датчике ЗЛК-20Э в диапазоне (600 – 2000) Гц при амплитуде ускорения более 4 g. Для получения данных по величине конструктивного запаса требуется доработка испытательного куба в части изменения конструкции посадочного места датчика с целью исключения появления резонансных частот в области (800–2000) Гц.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

- при расчете и конструировании упругих элементов для датчиков со вставным холодным катодом следует учитывать не только размеры деталей, определяющих величину посадочного места пружин, но и размер закруглений в местах соприкосновения деталей;
- датчики типа ЗЛК-16 и ЗЛК-20 ударо- и виброустойчивы в заданном диапазоне;
- выявлены различные типы колебаний разрезных пружин, что позволяет усовершенствовать конструкцию пружин.

Полученные результаты позволяют усовершенствовать конструкцию упругих элементов датчиков ЛГ и предотвратить нарушение их работы и выход из строя в условиях воздействия вибрационных и ударных нагрузок.

5.4. ИССЛЕДОВАНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В ШТАТНОМ ИНЕРЦИАЛЬНОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ БЛОКЕ

Наиболее перспективными для применения в системах, в которых требуется обеспечивать высокую точность при работе в большом диапазоне ускорений и в жестких условиях эксплуатации, являются компенсационные акселерометры с маятниками, изготовленными из кремния или кварца.

Они находят широкое применение в различных отраслях, начиная с навигационной техники для космической, ракетной, авиационной отраслей и заканчивая нетрадиционными применениями в строительстве, в системах мониторинга в инклинометрах для измерения профиля нефтяных и газовых скважин в процессе бурения.

Конструктивные схемы кремниевых и кварцевых акселерометров схожи (см. рис 1,2). Основными элементами конструкции являются маятниковый узел, состоящий из установочной рамки, упругого подвеса и лопасти, емкостной датчик угла и магнитоэлектрический датчик момента, который обеспечивает компенсацию отклонения лопасти маятника под воздействием ускорения. Ключевую роль в различии характеристик

двух типов акселерометров играет материал маятника. При этом следует иметь в виду главную особенность конструкционных материалов маятника. Она заключается в разности температурных коэффициентов расширения (ТКР) этих материалов. ТКР плавленого кварца практически равен ТКР материала магнитопровода магнитной системы акселерометра, выполненной из суперинвара 32НКД, в то время как ТКР кремния превышает его почти в 5 раз, что создает проблемы базирования кремниевых маятников на суперинваровых деталях. В то же время кремний имеет ряд очевидных технологических преимуществ перед кварцем, как в силу использования MEMS технологии, так и в силу дешевизны и доступности заготовок, в качестве которых используются стандартные кремниевые «вафли» электронной промышленности.

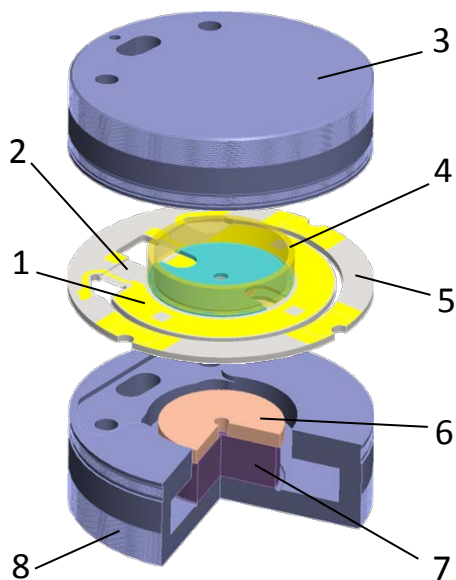


Рисунок 1 – Конструктивная схема кварцевого акселерометра: 1 - лопасть маятника; 2 - упругая балочка подвеса маятника; 3, 8 - магнитная система; 4 - катушка датчика силы; 5 – кольцо маятникового узла с установочными платиками; 6 - полюсный наконечник; 7 – постоянный магнит

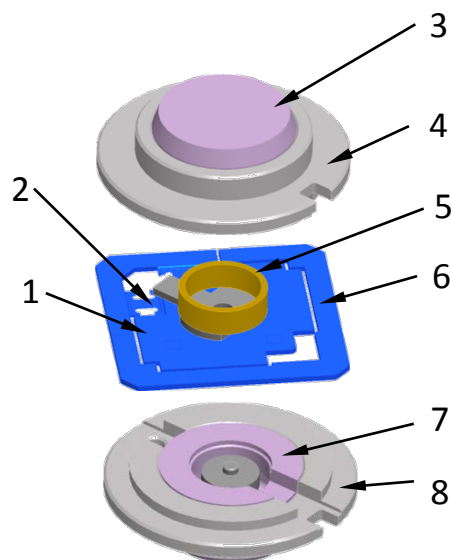


Рисунок 2 – Конструктивная схема кремниевого акселерометра: 1 – лопасть маятника; 2 – упругая балочка подвеса маятника; 3, 7 - магнитная система; 4, 8 – кварцевые кольца; 5 – катушка датчика силы; 6 – рамка маятникового узла с установочными платиками

Сравнительный анализ особенностей кремниевых и кварцевых акселерометров, обусловленных конструкционными материалами. Более детальное сравнение свойств кварца и кремния дает возможность отметить следующие особенности приборов, обусловленные различием материалов:

- модуль упругости кварца (107 ГПа) примерно в два раза меньше, чем у кремния (160 ГПа). Это позволяет при одинаковых прочностных свойствах упругого подвеса маятника иметь в два раза меньшую жесткость кварцевого подвеса по сравнению с кремниевым подвесом и по этой причине в два раза снизить требования в кварцевых приборах к величине временного и температурного дрейфа нуля усилителя компенсационного контура;

- теплопроводность кремния (157 Вт/(°С·м)) многократно превышает теплопроводность кварца (1,38 Вт/(°С·м)). По этой причине можно ожидать меньший перегрев лопасти и катушек у кремниевых маятников;

- кварц имеет $\text{ТКР} = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ } 1^\circ\text{C}$ против $\text{ТКР} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ } 1^\circ\text{C}$ у кремния. По этой причине детали из кварца имеют значительно меньшее изменение размеров при изменении температуры по сравнению с деталями из кремния;

– ТКР кварца ($0,55 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) идеально сочетается с ТКР магнитопроводов из суперинвара 32НКД, равным $0,56 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Поэтому в акселерометрах с кварцевым маятником существенно проще решается проблема фиксации маятника и, следовательно, легче может быть обеспечена существенно более высокая стабильность смещения нуля;

– кремний также может хорошо сочетаться по ТКР с рядом инвароподобных сплавов, однако у выпускаемых промышленностью материалов, например 39Н, имеется паспортное значение ТКР, близкое к кремнию. Но разброс ТКР при допустимой разнице содержания никеля в сплаве 39Н от 38 % до 40 % даёт разброс ТКР от $2 \cdot 10^{-6}$ до $4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Это приводит к существенным проблемам при базировании маятника и к связанной с этим проблеме нестабильности смещения нуля. Приемлемой для кремния парой является пирекс, но использование промежуточных слоев при соединении маятника с инваровыми деталями магнитопроводов приводит к усложнению конструкции акселерометра;

– кварц является изолятором, следовательно, его нельзя использовать без напыления электродов, применяемых в качестве подвижных электродов емкостного датчика угла и токоподводов к ним. Кремний обладает достаточной электропроводностью для использования его в качестве подвижного электрода емкостного датчика угла без дополнительного напыления электродов и токоподводов;

– маятник из монокристаллического кремния может изготавливаться методами, хорошо освоенными электронной промышленностью, и из стандартных заготовок. Обычно для кремния, легированного фосфором, применяется метод фотолитографии и жидкостного анизотропного травления в 33 %-ном водном растворе КОН при температуре от $100 \text{ }^\circ\text{C}$ до $107 \text{ }^\circ\text{C}$. Иногда используется ионно-плазменное травление. Важно отметить, что процесс жидкого травления идет анизотропно, что позволяет обеспечить однозначное и точное соответствие используемых при фотолитографии шаблонов и формы изготавливаемых маятников. Анизотропное травление позволяет получить сложные формы упругого подвеса лопасти маятника (плоские балочки, крестовидные и Х-образные растяжки). Защитной пленкой при выполнении травления является слой окиси кремния, выращенный в окислительной среде (влажного кислорода) при температуре $\sim 1100 \dots 1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Кремниевые заготовки – «вафли», используемые при изготовлении маятников, массово выпускаются предприятиями электронной промышленности и дешевы. Легко реализуется групповое изготовление маятников. Кварцевые маятники до последнего времени изготавливались индивидуально из специальных заготовок и потому были дороги. Появившиеся в настоящее время «вафли» из плавящего кварца допускают переход к групповой технологии. Но здесь технологический процесс существенно затруднен из-за необходимости многократного нанесения защитных пленок золота с хромовым подслоем (толщиной до 8 микрон) и проведения многократных фотолитографий. Иначе не удастся получить требуемую форму упругой перемычки – процесс травления кварца в плавиковой кислоте идет изотропно. Достигнутая форма упругого подвеса – плоская упругая балочка.

Таким образом, на сегодняшний день кремний является более технологичным материалом и позволяет получить более дешевую продукцию. Вместе с тем кремний уступает плавящему кварцу по возможности обеспечивать более высокие точностные характеристики приборов.

Из изложенного видно, что отдать приоритет одному или другому типу акселерометров для применения в конкретной системе не представляется возможным без проведения сравнительных испытаний приборов на основе как кремния, так и кварца.

Выбор акселерометров для проведения сравнительных испытаний. Целью настоящих исследований явился выбор акселерометра, наиболее соответствующего требованиям по акселерометрическому тракту для инерциального измерительного блока (ИИБ).

Исходя из специфики применения ИИБ, требующей обеспечения малого времени готовности после подачи питания (как следствие – отсутствие термостата) в условиях широкого диапазона ускорений и температур, для ИИБ были выбраны маятниковые

газонаполненные приборы. К ним относятся кварцевые акселерометры типа QA-2000, QA-3000, А-18, ВА-3, АК-6, а также вновь разработанные АК-15, А-18Т и ААК-02.

Поскольку в изделии ИИБ невозможна предстартовая калибровка по каналам акселерометров, важнейшую роль приобретает невоспроизводимость параметров акселерометров, а именно масштабного коэффициента, смещения нуля и двух углов, определяющих положение базовой плоскости. Ошибки тем более возрастают после воздействия предельных повышенных и пониженных температур, поскольку при этом складываются температурные гистерезисы параметров с кратковременными и долговременными нестабильностями.

Именно поэтому для первичной оценки пригодности акселерометров к применению в ИИБ были избраны невоспроизводимость вышеуказанных параметров после воздействия предельных как повышенных, так и пониженных температур.

Подробное исследование различных типов акселерометров приводится далее.

Анализ акселерометров для применения в ИИБ. В настоящее время имеются как серийно выпускаемые, так и вновь освоенные в производстве акселерометры, близкие по параметрам требованиям для акселерометров в ИИБ: невоспроизводимость масштабного коэффициента $9 \cdot 10^{-5}$ отн.ед., невоспроизводимость смещения нуля $8 \cdot 10^{-5}$ g, изменение углов ориентации базовой плоскости $\pm 40''$. Характеристики акселерометров по ТУ или рекламным проспектам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики акселерометров по ТУ и рекламным проспектам, а также требования к акселерометрическому каналу ИИБ

Наименование параметра	Ед. измер.	Требования к ИИБ	А-18	АК-15	ВА-3	А-18Т	АК-6	Е1
Невоспроизводимость масштабного коэффициента	Отн. ед.	$9 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-5}$	$24 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Невоспроизводимость смещения нуля	g	$8 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$16 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
Изменение углов ориентации базовой плоскости	...''	± 40	± 30	± 4	± 20	± 20	± 10	± 20
Диапазон измеряемых ускорений	g	± 40	± 40	± 20	± 50	± 40	± 20	± 50
Диапазон рабочих температур	°С	-55...+85	-50...+75	-60...+70	-55...+85	-50...+85	-60...+80	-55...+85
Материал маятника			кремний	кварц	кварц	кремний	кварц	кварц
Производитель			ИТТ	МИЭА	Электро-оптика	ИТТ	Серп. завод Металлист	Китай
Цена	тыс. руб.		190	210	250	250	220	130

Предварительные проверки акселерометров, представленных в таблице, показали, что их параметры не всегда соответствуют рекламируемым. Поэтому потребовалась разработка специальной методики для проведения их тщательного анализа в температурном диапазоне. Этой методикой предусматривается измерение невоспроизводимости параметров с высокой точностью в связи с тем, что данная характеристика не подлежит алгоритмической коррекции и окажет решающее влияние на точность канала акселерометров ИИБ.

Далее приводится описание разработанной методики и результаты измерений.

Методика испытаний акселерометров. При проведении испытаний на невоспроизводимость параметров была использована следующая методика, состоящая из 5 этапов.

Акселерометры закреплялись на делительной головке в камере тепла и холода. В камере устанавливалась температура $+25\pm 1$ °С, и акселерометры выдерживались при этой температуре 2 часа. Затем акселерометры включались. Через 1,5 часа работы производилось измерение масштабного коэффициента, смещения нуля и углов отклонения базовой плоскости акселерометров. При этом по встроенному термодатчику контролировалась температура акселерометров. Погрешности измерения при этом составляли: по масштабному коэффициенту $\pm 0,5 \cdot 10^{-5}$ отн. ед., по смещению нуля $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ g, по углам отклонения базовой плоскости $\pm 10''$, по температуре $\pm 0,2$ °С.

Затем акселерометры выключались, а в камере устанавливалась температура -50 ± 1 °С, и акселерометры выдерживались при этой температуре 2 часа. После этого акселерометры включались на 1,5 ч при этой температуре, и производилось измерение значения масштабного коэффициента, смещения нуля и углов отклонения базовой плоскости.

Затем описанная процедура повторялась при температурах $+25\pm 1$ °С, $+75\pm 1$ °С, $+25\pm 1$ °С с измерением масштабного коэффициента, смещения нуля и углов отклонения базовой плоскости акселерометров и контролем по встроенному термодатчику температуры акселерометров.

По пяти полученным для каждого акселерометра значениям рассчитывались температурная зависимость масштабного коэффициента, смещения нуля и углов отклонения базовой плоскости (полином второго порядка). Для трех значений при $+25\pm 1$ °С рассчитывалась невоспроизводимость этих параметров, равная максимальному отклонению от температурной зависимости. Такая методика позволяет учесть все температурные погрешности до третьего порядка малости и обеспечить необходимую точность измерения в камере тепла и холода, имеющей погрешность установки температуры ± 1 °С.

Результаты испытаний конкретных акселерометров приведены в табл. 2. По каждому параметру указаны диапазоны значений, полученных для нескольких образцов акселерометров, которые одновременно участвовали в испытаниях.

Таблица 2

Характеристики акселерометров по результатам испытаний

Наименование параметра	Ед. измер.	А-18	АК-15	А-18Т	АК-6	Е1
Невоспроизводимость масштабного коэффициента	Отн.ед.	$(10-95) \cdot 10^{-5}$	$(16-18) \cdot 10^{-5}$	$(3-5) \cdot 10^{-5}$	$(3-7) \cdot 10^{-5}$	$(1-24) \cdot 10^{-5}$
Невоспроизводимость смещения нуля	g	$(15-19) \cdot 10^{-5}$	$(1-3) \cdot 10^{-5}$	$(15-28) \cdot 10^{-5}$	$(4-8) \cdot 10^{-5}$	$(4-6) \cdot 10^{-5}$
Изменение углов ориентации базовой плоскости	...''	$\pm(20-32)$	$\pm(21-24)$	$\pm(9-13)$	$\pm(3-6)$	$\pm(10-12)$

Как видно из таблицы, из всех представленных на испытания приборов ни один из акселерометров не соответствует полностью требованиям, предъявляемым к каналу акселерометров ИИБ, однако в разной степени.

Проанализируем каждый из испытанных акселерометров с точки зрения несоответствия различных его параметров требуемым значениям и возможных причин такого несоответствия.

Акселерометр АК-6 соответствует требованиям для ИИБ, за исключением диапазона измеряемых ускорений.

Акселерометр А-18 не соответствует требованиям для ИИБ по параметрам невоспроизводимости масштабного коэффициента, невоспроизводимости смещения нуля, изменению углов ориентации базовой плоскости.

Акселерометр АК-15 не соответствует требованиям для ИИБ по параметрам невоспроизводимости масштабного коэффициента и диапазону измеряемых ускорений.

Акселерометр Е1 не соответствует требованиям для прибора ИИБ по параметру невоспроизводимости масштабного коэффициента (пять приборов из шести). В то же время небольшая часть приборов Е1 показывает исключительно высокие точностные характеристики, что свидетельствует, с одной стороны, об удачной конструкции, являющейся копией американского кварцевого акселерометра QA-3000, а с другой – о неотработанности технологии производства этих акселерометров.

Макет акселерометра А-18Т не соответствует требованиям для прибора ИИБ по параметру невоспроизводимости смещения нуля.

Необходимо отметить, что все испытанные акселерометры, кроме АК-6, А-18 и АК-15 реально не соответствуют указанным в рекламных проспектах и ТУ параметрам.

Все акселерометры с маятником из кремния не соответствуют требованиям по параметру невоспроизводимости смещения нуля. Это, по-видимому, является недостатком, принципиально присущим акселерометрам с конструктивной схемой, используемой в А-18.

В то же время все акселерометры с маятником из кварца соответствуют требованиям по параметрам невоспроизводимости смещения нуля и изменения углов ориентации базовой плоскости, а остальные параметры весьма близки к требуемым.

Соответствие требованию по параметрам невоспроизводимости масштабного коэффициента и диапазону измеряемых ускорений для приборов с маятником из кварца определяется искусством конструктора и является вполне достижимым, особенно при использовании современных магнитов с малым температурным гистерезисом.

Организация группового изготовления кварцевых маятников из серийно выпускаемых кварцевых заготовок (вафель) большого диаметра при минимуме ручных операций с использованием MEMS технологий позволит устранить недостаток кварца по сравнению с кремнием – невозможность использования групповых технологий и существенно уменьшит стоимость кварцевых акселерометров по сравнению со сложившимися на российском рынке ценами. При этом отсутствие операций механической обработки маятников будет способствовать увеличению точности приборов.

Результаты проведенных испытаний, анализ конструктивных особенностей рассмотренных акселерометров и технологических особенностей их производства позволяют сделать следующие выводы.

Поскольку наиболее приближен по точностным параметрам к требованиям ИИБ именно АК-6, следует взять именно его конструкцию за основу для доработки акселерометра под требования ИИБ с рекомендацией внедрения при производстве новейших групповых технологий, обеспечивающих повышение производительности и снижение стоимости. Увеличение диапазона измерений АК-6 достигается без внесения конструктивных изменений. Для уменьшения времени прогрева и повышения стабильности смещения нуля следует вынести за пределы корпуса собственно акселерометра основные тепловыделяющие элементы, прежде всего электронику усилителя обратной связи. Проведение этих очевидных

доработок позволит производить серийные отечественные акселерометры типа АК-6, полностью обеспечивающие требования к акселерометрическому тракту ИИБ.

5.5.ИННОВАЦИОННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТОК МЕЖРЕГИОНАЛЬНОМ ОБЩЕСТВЕННОМ УЧРЕЖДЕНИИ «ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ» В ОБЛАСТИ НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (МОУ «ИИФ») создано 27 апреля 1993 года. Институт является добровольным, самоуправляемым, некоммерческим учреждением ученых, педагогов и специалистов России и в своей работе опирается на комплексный, системный подход к инновационной деятельности.

В 2001 г. Институт аккредитован как научная организация Министерством промышленности, науки и технологий РФ, в 2013 г. Министерством образования и науки. Научный потенциал включает 22 доктора наук, 95 кандидатов наук, 21 профессора, 84 доцента, 5 заслуженных деятелей науки. Институт имеет лицензии и сертификаты на различные виды деятельности более 15 министерств и ведомств в том числе: Минобороны, ФСБ, ФСТЭК СВР и МЧС России; Рособоронзаказ; Ростехнадзор; Рособрнадзор; ГК «Росатом»; Роскосмос; Минпромторг.

Основными видами деятельности Института являются:

1. научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Серийные поставки.
2. Сертификация средств защиты информации, аттестация объектов информатизации.
3. Предоставление телекоммуникационных услуг.
4. Разработка и установка техники общего и специального назначения.
5. предоставление электроизмерительных услуг.
6. Метрологическая экспертиза проектов.
7. Экспертиза промышленной безопасности.
8. Информационно-издательская деятельность.
9. Образовательная деятельность.
10. Социальная адаптация военнослужащих и членов их семей.

В составе научно-исследовательского центра функционирует отдел навигационных систем и комплексов, представителями которого являются соавторы данного доклада Беркович С.Б. и Котов Н.И.

Целью данного доклада является обобщение и представление новых результатов по созданию и испытаниям интегрированных инерциально-геоинформационных навигационных комплексов, а также технические предложения построения метрологического комплекса проверок и калибровок высокоточных гироскопических средств азимутального ориентирования и геодезических измерительных средств, который находится в завершающей стадии создания на территории МОУ «ИИФ».

Состав и содержание базовой технологии построения и испытаний интегрированных инерциально-геоинформационных навигационных комплексов

Базовая технология построения и испытаний интегрированных инерциально-геоинформационных навигационных комплексов (ИГНК), как концепция и совокупность методов, математических моделей, информационных и геоинформационных технологий, а также аппаратных средств включает в свой состав следующие элементы:

1. Концепцию построения интегрированных инерциально-геоинформационных навигационных комплексов.
2. Базовый вариант интегрированного ИГНК.