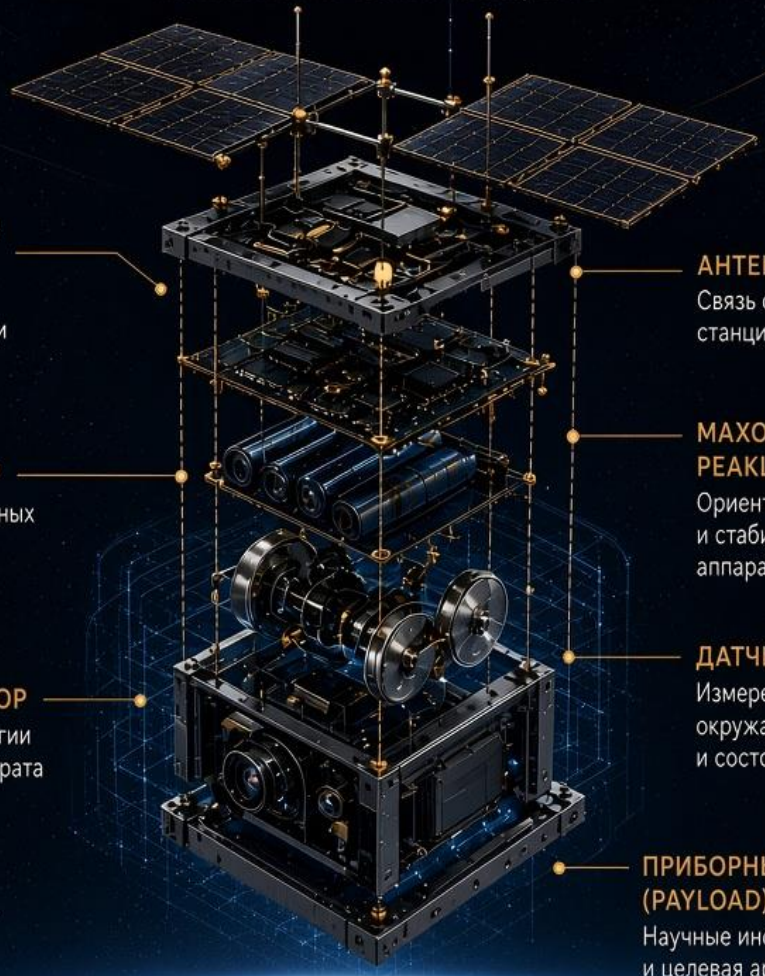
Александр Кальченко

АНАТОМИЯ И ФИЗИОЛОГИЯ КУБСАТОВ

Структура, системы и принципы функционирования малых космических аппаратов



СОЛНЕЧНЫЕ ПАНЕЛИ
Генерация электроэнергии

БОРТОВОЙ КОМПЬЮТЕР
Обработка данных и управление системами

АККУМУЛЯТОР
Хранение энергии и питание аппарата

АНТЕННЫ
Связь с наземными станциями

МАХОВИКИ РЕАКЦИИ
Ориентация и стабилизация аппарата

ДАТЧИКИ
Измерение параметров окружающей среды и состояния

ПРИБОРНЫЙ ОТСЕК (PAYLOAD)
Научные инструменты и целевая аппаратура

Александр Кальченко

АНАТОМИЯ И ФИЗИОЛОГИЯ КУБСАТОВ

Обзор конструкции, подсистем и жизненного цикла наноспутников стандартного форм-фактора

Системный взгляд на устройство, функционирование и эволюцию современных кубсатов

Москва, 2026

От автора

Введение

Оглавление

Часть I. Анатомия кубсата

1. Скелет и несущие структуры
Стандартизация форм-факторов CDS (1U–16U+), эволюция механических спецификаций; алюминиевые сплавы 6061/7075, композиты и PEEK; твёрдое анодирование и требования к рельсам; центр масс и моменты инерции; интерфейс с деплойером (P-POD, CSD и др.); подпружиненные толкатели, deployment switches и механика безопасного отделения.

2. Внутренняя топология и анатомическая компоновка
Принципы размещения модулей в ограниченном объёме; архитектуры PC/104 и backplane; кабельные трассы и минимизация жгутов; распределение масс и тензор инерции; тепловые интерфейсы между модулями; обеспечение электромагнитной совместимости при высокой плотности упаковки; интеграция полезных нагрузок.

3. Физические магистрали и интерфейсы
Электрические шины питания и сигнальные линии; информационные интерфейсы и протоколы; тепловые мосты, TIM и гибкие тепловые связи; разъёмы (Micro-D, SMA/SMP и др.); стандартизированные механические и электрические интерфейсы; особенности кабельной сети в вакууме (изоляция, экранирование, outgassing).

Часть II. Физиология кубсата

4. Энергетический метаболизм (EPS)
Солнечные панели и их деградация; литий-ионные и LFP-аккумуляторы, ресурс при LEO-циклировании; BMS и защита батареи; MPPT и архитектуры преобразования; регулируемые и нерегулируемые шины (3,3 В, 5 В, 12 В); электронные предохранители и защита от одиночных эффектов; расчёт энергобаланса и режимы работы.

5. Гомеостаз и терморегуляция (TCS)
Уравнение теплового баланса в вакууме; пассивные покрытия и отношение α/ε; многослойная изоляция (MLI) и её ограничения на кубсатах; радиаторы и тепловые мосты (медь, графит, тепловые трубки); тонкоплёночные нагреватели; фазопереходные материалы; узловые тепловые модели и термовакуумные испытания.

6. Нервная система и вычисления (OBDH / OBC)
Эволюция процессорных платформ (ARM, RISC-V, FPGA); гетерогенные архитектуры; RTOS и Linux в бортовых условиях; шины и протокол CSP; механизмы FDIR; Safe Mode и сторожевые таймеры; обеспечение отказоустойчивости при использовании COTS.

7. Моторика и пространственные рефлексы (ADCS & Propulsion)

Сенсоры ориентации (магнитометры, солнечные датчики, гироскопы, стар-трекеры, датчики горизонта); актюаторы (магнитные катушки, реакционные колёса, CMG); алгоритмы B-dot, TRIAD/QUEST, MEKF и законы прецизионного наведения; двигательные установки (холодный газ, электроспрей, PPT, двигатели Холла); выбор типа тяги по Δv, мощности и безопасности.

8. Физиология связи и внешней коммуникации (COMMS)

Диапазоны VHF/UHF, S, X и Ka: назначение, преимущества и ограничения; антенны (патч, диполи, спиральные, рупорные, фазированные решётки и reflectarray); бюджет радиолинии (EIRP, G/T, потери); модуляция (BPSK, QPSK, APSK) и помехоустойчивое кодирование (Reed-Solomon, LDPC, DVB-S2); влияние атмосферы, ионосферы и эффекта Доплера.

Часть III. Патофизиология, эволюция и жизненный цикл

9. Влияние агрессивной космической среды

Накопленная доза радиации (TID) и одиночные эффекты (SEU, SEL, SEFI); методы защиты (TMR, ECC, scrubbing, RHBD); атомарный кислород и эрозия полимеров на VLEO/LEO; дегазация материалов (TML/CVCM, bake-out); термоциклирование и термоудар; совокупное воздействие среды как «патофизиология» аппарата.

10. Эволюция и адаптация (жизненный цикл и надёжность)

Причины пониженной надёжности и эффект «младенческой смертности»; FMEA/FMECA как инструмент системной инженерии; ограниченное резервирование критичных узлов; деградация аккумуляторов, солнечных панелей и механических приводов; стратегии End-of-Life; пассивные drag sails и активный увод; требования ISO 24113 и современные нормы по космическому мусору.

Приложение А. Стандарты сертификации кубсатов

CDS Rev. 14.1, ISO 17770, 19683, 17981, 24113; GEVS и ECSS; требования деплойеров; практическая схема квалификации и лицензирования.

Приложение Б. Англо-русский глоссарий ключевых терминов

Основные термины и устойчивые выражения обзора с смысловыми русскими эквивалентами и краткими пояснениями роли в контексте анатомии и физиологии кубсатов.

Заключение

От автора

Кубсаты сегодня занимают особое место в космической деятельности. Ещё недавно они воспринимались главным образом как учебные или демонстрационные аппараты, доступные университетам и небольшим лабораториям. За сравнительно короткий срок ситуация изменилась. Малые спутники стандартного форм-фактора стали инструментом регулярного наблюдения Земли, связи, научных измерений, отработки технологий и коммерческих сервисов. Их число на орбите растёт, спектр задач расширяется, а вокруг них формируется собственная экосистема поставщиков платформ, модулей, запусков и услуг по обработке данных. Именно поэтому тема кубсатов представляется одной из наиболее актуальных для понимания того, куда движется современная «малая» космонавтика.

С технической точки зрения кубсат – это полноценный орбитальный аппарат, сжатый до предельно малого объёма и массы. В нём присутствуют все основные подсистемы большого спутника: несущая конструкция, энергопитание, терморегулирование, бортовой компьютер, система ориентации, радиолиния, а нередко и двигательная установка. При этом каждое решение подчинено жёстким ограничениям по массе, габаритам, энергии и стоимости. Стандартизация форм-фактора, широкое использование коммерческой элементной базы и модульный подход резко снизили порог входа. То, что раньше требовало многолетней разработки и значительных ресурсов, теперь может быть реализовано заметно быстрее и дешевле. Это не упрощение ради упрощения, а иной инженерный стиль – более итеративный, более терпимый к риску на уровне отдельного аппарата и более ориентированный на серийность и обновляемость группировок.

Экономическое измерение этой трансформации не менее существенно. Классическая космическая отрасль долгое время оставалась сферой крупных государственных программ и немногочисленных промышленных игроков. Кубсаты изменили структуру затрат и сроки возврата инвестиций. Высокая частота запусков и относительно короткий цикл «разработка – орбита – результат» позволяют быстрее проверять технические и бизнес-гипотезы. Появляется возможность гибко менять полезную нагрузку, наращивать группировки поэтапно, предлагать услуги не только крупным заказчикам, но и более широкому кругу потребителей данных и сервисов. Формируется то, что можно назвать малой космической экономикой: рынок платформ и компонентов, рынок запусков как услуги, рынок данных дистанционного зондирования и интернета вещей, новые модели страхования и разделения рисков. В этой экономике важны не только отдельные рекордные характеристики аппарата, но и воспроизводимость, предсказуемость сроков и способность быстро адаптироваться к меняющемуся спросу.

Есть и политико-институциональный аспект. Малые аппараты обновляются на орбите значительно чаще, чем тяжёлые классические спутники. Полный цикл от идеи и правовой модели до практических результатов здесь может занимать полтора–два года вместо восьми–десяти лет, характерных для крупных проектов. Это создаёт более высокую частоту «институциональных циклов»: быстрее накапливается опыт регулирования, быстрее выявляются пробелы в нормах, быстрее появляется возможность корректировать подходы к лицензированию, частотному обеспечению, ответственности и завершению миссий. Кроме того, сегмент малых спутников до сих пор воспринимается многими традиционными игроками как периферийный. Это снижает регуляторное трение и оставляет пространство для экспериментов с новыми правилами, стандартами и форматами международного

сотрудничества – от научно-образовательных миссий до совместных группировок наблюдения Земли и интернета вещей.

Отдельного внимания заслуживает освоение сверхнизких орбит. Кубсаты оказались удобным инструментом для работы на высотах, где атмосферное торможение само по себе обеспечивает относительно быстрый сход с орбиты. Это одновременно снижает остроту проблемы космического мусора и открывает новый эксплуатационный режим, в котором короткие сроки жизни аппарата компенсируются высокой детальностью съёмки, меньшими требованиями к мощности передатчиков и возможностью чаще обновлять группировку. Здесь техническое, экономическое и экологическое измерения тесно переплетаются.

Настоящий обзор возник из потребности разобраться в устройстве этих аппаратов системно, а не по отдельным подсистемам. Существует множество отличных технических описаний солнечных панелей, бортовых компьютеров, систем ориентации или радиолиний. Значительно меньше текстов, которые пытаются показать кубсат как целостный «живой организм»: с несущим скелетом, энергетическим метаболизмом, тепловым гомеостазом, нервной системой вычислений, моторикой ориентации и внешними «органами чувств» связи – и при этом проследить, как этот организм стареет, деградирует и завершает свой жизненный цикл в соответствии с требованиями по космическому мусору. Цель работы состояла именно в том, чтобы создать такой цельный взгляд.

Это не энциклопедия и не руководство по проектированию. Обзор не претендует на исчерпывающую полноту по каждому узлу и не заменяет специализированные стандарты, ICD деплойеров или детальные расчёты энерго- и теплового баланса. Его задача скромнее и, как представляется, не менее полезна: стать «мостиком» для тех, кто хочет получить целостное впечатление о том, что такое кубсат как орбитальный космический аппарат. Понять, из чего он состоит, как эти части связаны между собой, какие ограничения накладывает среда и почему одни технические решения оказываются удачными, а другие – нет. Иными словами – познакомиться с «анатомией» и «физиологией» малого спутника достаточно основательно, чтобы дальнейшее чтение узкоспециальных материалов или собственная инженерная работа строились уже на общей картине, а не на разрозненных фрагментах.

Если этот текст поможет читателю увидеть за маленьким кубом со стороной десять сантиметров полноценную инженерную систему, работающую в агрессивной среде по понятным физическим и экономическим законам, – задача обзора будет выполнена. А понимание устройства и логики кубсатов, в свою очередь, необходимо тем, кто думает о будущем малой космической экономики, о новых сервисах, о регулировании и о том, как сделать доступ в космос не только технологически возможным, но и устойчивым.

А.Н. Кальченко

Кандидат технических наук,
Ведущий инженер ООО «Национальное бюро интеллектуальных технологий»
Генеральный директор «Агентства по сетевым, информационным и коммуникационным технологиям»

Введение

За последнее десятилетие кубсаты перестали быть уделом университетских лабораторий и студенческих экспериментов. Их число на орбите растёт лавинообразно, а спектр решаемых задач стремительно расширяется: от простых технологических демонстраций до регулярного дистанционного зондирования Земли, связи, научных измерений, отработки новых технологий и даже элементов космической инфраструктуры. Параллельно развивается целый рынок сервисов – от поставки готовых платформ и модулей до услуг запуска, эксплуатации и обработки данных. Перспективы монетизации выглядят всё более привлекательными как для разработчиков, так и для инвесторов.

Экономика кубсатов несколько отличается от экономики классических космических аппаратов. Они дешевле в разработке и производстве, предъявляют существенно более мягкие требования к комплектующим, допускают широкое использование коммерческой элементной базы (COTS) и готовых функциональных блоков. Высокая модульность позволяет собирать аппарат из относительно стандартных подсистем, а упрощённые процедуры сертификации и квалификации сокращают сроки и стоимость вывода на орбиту. Всё это создаёт благоприятную среду для частного предпринимательства и привлекает капитал в сектор коммерциализации результатов космической деятельности.

И тем не менее кубсат для многих остаётся «чёрным ящиком». Сам факт, что это полноценный космический объект, решающий реальные орбитальные задачи, часто вызывает настороженность. В массовом сознании космический аппарат по-прежнему ассоциируется с многотонными конструкциями, сложнейшими системами и бюджетами, исчисляемыми сотнями миллионов. На этом фоне небольшой куб со стороной десять сантиметров выглядит почти игрушкой – и именно поэтому его внутренняя организация, принципы работы и ограничения остаются малопонятными за пределами узкого круга специалистов.

Настоящий обзор написан именно для того, чтобы приоткрыть эту «щелочку». Это не энциклопедия и не исчерпывающее техническое описание всех систем и служб. Это скорее «первое свидание» – возможность познакомиться с анатомией и физиологией кубсата, понять, как устроены его «скелет», «метаболизм», «нервная система» и «органы чувств», какие угрозы несёт космическая среда и как аппарат проживает свой жизненный цикл от старта до сведения с орбиты. Если знакомство окажется удачным, оно может стать началом более прочных и долговременных «семейных уз» – интереса, понимания и, возможно, собственного участия в разработке, эксплуатации или использовании этих удивительных маленьких космических аппаратов.

Часть I. Анатомия кубсата

1. Скелет и несущие структуры

Скелет кубсата – это его несущая конструкция, которая одновременно выполняет функции механической защиты полезной нагрузки, обеспечения интерфейса с пусковым контейнером (deployer) и передачи всех нагрузок, возникающих на этапах выведения, отделения и орбитальной эксплуатации. В отличие от крупных космических аппаратов, где силовая схема может быть существенно индивидуализирована, конструкция кубсата жёстко ограничена стандартами, прежде всего CubeSat Design Specification (CDS, актуальная редакция Rev. 14.1) и ISO 17770. Эти документы задают не только габариты, но и требования к рельсам, материалам, качеству поверхности и механике разделения. Ниже последовательно рассматриваются три ключевых аспекта: эволюция форм-факторов, материаловедение каркасов и механика разделения.

Стандартизация форм-факторов: эволюция механических спецификаций от 1U/3U к 6U, 12U и 16U+

Идея стандартизированного «строительного блока» размером 10 × 10 × 10 см возникла в конце 1990-х годов в Калифорнийском политехническом университете (Cal Poly) и Стэнфорде. Первоначальная цель была образовательной: снизить порог входа в космические проекты для университетов. Базовая единица – 1U, была определена как объём 100 × 100 × 100 мм с массой порядка 1 кг (позже лимит был повышен). Уже на ранних этапах стало ясно, что для реальной полезной нагрузки требуется дополнительное пространство, поэтому появились кратные конфигурации: 1,5U, 2U и особенно 3U (100 × 100 × 340,5 мм). Именно 3U-форм-фактор стал «рабочей лошадкой» первого поколения кубсатов и до сих пор остаётся наиболее массовым.

С ростом сложности миссий (высокое разрешение съёмки, межспутниковая связь, двигательные установки, научные приборы) объёма 3U стало недостаточно. В 2010-х годах появились спецификации 6U (типично 100 × 226,3 × 366 мм) и 12U (226,3 × 226,3 × 366 мм). CDS Rev. 14 объединил требования к 1U–12U в единый документ. Сегодня коммерческие деплойеры поддерживают и 16U (примерно 226 × 226 × 488 мм), а отдельные проекты рассматривают 27U и более крупные конфигурации. Максимальные массы по CDS Rev. 14.1 составляют: 2 кг для 1U, 6 кг для 3U, 12 кг для 6U и 24 кг для 12U (ранее лимит был ближе к 1,33 кг/U).

Важной особенностью современных спецификаций является наличие дополнительного объёма – так называемого «tuna can» на торцах 3U/6U/12U. Этот цилиндрический или прямоугольный выступ за пределами номинального конверта позволяет размещать антенны, двигатели, радиаторы или оптику, не нарушая основной габарит. Координатная система стандартизована: ось Z направлена вдоль длинной стороны (направление выталкивания из деплойера), плоскости ±Z – торцы, а четыре продольных ребра образуют направляющие рельсы.

Эволюция форм-факторов сопровождалась развитием коммерческих платформ. Сегодня производители (EnduroSat, ISIS, NanoAvionics, Pumpkin, GomSpace и др.) предлагают готовые

каркасы от 0,5U до 16U+, что резко сократило время разработки механической части и позволило сосредоточиться на полезной нагрузке. Вместе с тем стандартизация сохраняет критическую совместимость: любой кубсат, удовлетворяющий CDS, может быть размещён практически в любом современном деплойере.

Материаловедение каркасов: алюминиевые сплавы, композиты, PEEK-полимеры; анодирование и требования к направляющим рельсам

Основным материалом несущих конструкций кубсатов остаётся алюминиевый сплав. Наиболее распространёнными являются 6061-T6 (или T651) и 7075 (T6, T73, T7351). Сплав 6061-T6 обладает хорошей обрабатываемостью, свариваемостью, коррозионной стойкостью и относительно низкой стоимостью; он широко используется для корпусов и панелей. 7075-T6/T73 значительно прочнее и жёстче, поэтому предпочтителен для высоконагруженных элементов, особенно рельсов, которые непосредственно контактируют с деплойером. Коэффициент линейного теплового расширения этих сплавов близок к материалу большинства деплойеров (часто тоже 7075), что минимизирует термомеханические напряжения при циклическом изменении температуры.

Требования CDS к материалам жёсткие. Для рельсов и элементов, контактирующих с деплойером, предписаны алюминиевые сплавы 7075, 6061, 6082, 5005 или 5052. Любые другие материалы требуют согласования (waiver). Критически важным является поверхностное покрытие: все алюминиевые поверхности, соприкасающиеся с рельсами деплойера или соседними кубсатами, должны быть твёрдоанодированы (hard anodizing, Type III). Твёрдое анодирование создаёт износостойкий оксидный слой толщиной 25–50 мкм, предотвращает холодную сварку (cold welding) в вакууме и обеспечивает электрическую изоляцию. Без него два чистых алюминиевых контакта в вакууме могут свариться под действием вибрации и давления, что приведёт к заклиниванию при отделении.

Геометрия рельсов строго регламентирована:

- минимальная ширина рельса – 8,5 мм (от края до первой выступающей детали);
- шероховатость поверхности $Ra \leq 1{,}6$ мкм;
- радиус скругления кромок ≥ 1 мм;
- площадь контактной поверхности на торцах $\pm Z$ – не менее $6{,}5 \times 6{,}5$ мм;
- не менее 75 % длины рельса должно находиться в контакте с направляющими деплойера (до 25 % допускается утопить);
- максимальный выступ любых элементов за плоскость рельсов – 6,5 мм.

Эти требования обеспечивают плавное скольжение, отсутствие заклинивания и предсказуемую кинематику отделения.

Параллельно с алюминием активно развиваются альтернативные материалы. Композиты на основе углепластика (CFRP) позволяют снизить массу каркаса на 20–30 % при сохранении жёсткости. Гибридные конструкции (алюминиевые рельсы + композитные панели) уже имеют успешный полётный опыт. Полимеры семейства PEEK (полиэфирэфиркетон) и PEI (полиэфиримид, Ultem) применяются для вторичных конструкций, держателей плат и даже экспериментальных полностью полимерных каркасов, изготавливаемых аддитивными

методами. PEEK обладает высокой термостойкостью, низким газовыделением и хорошей радиационной стойкостью, однако для рельсов, требующих твёрдости ≥ 65 HRC, алюминий пока остаётся незаменимым. В ряде проектов рельсы изготавливают отдельно из 7075 и приклеивают/механически крепят к полимерному или композитному корпусу.

Важным аспектом материаловедения является соответствие требованиям по газовыделению (outgassing): TML ≤ 1,0 %, CVCM ≤ 0,1 %. Все материалы, используемые в вакууме, проходят соответствующие испытания по ASTM E595 или эквивалентным стандартам.

Механика разделения: пусковые контейнеры, подпружиненные шток-толкатели и микровыключатели развёртывания

Надёжное отделение кубсата от ракеты-носителя обеспечивается стандартизированными пусковыми контейнерами (dispensers / deployers). Исторически первым и наиболее распространённым стал P-POD (Poly Picosatellite Orbital Deployer), разработанный в Cal Poly. P-POD представляет собой прямоугольный алюминиевый контейнер с четырьмя внутренними направляющими рельсами, торцевой дверью и подпружиненной толкающей пластиной. После открытия двери (обычно с помощью пиротехнического или электромеханического замка) пружина выталкивает кубсат (или стек из нескольких кубсатов) вдоль рельсов. P-POD рассчитан преимущественно на 1–3U.

С появлением 6U и 12U получили распространение более совершенные системы. Наиболее известна CSD (Canisterized Satellite Dispenser) компании Planetary Systems Corporation (ныне Rocket Lab). CSD использует табовую (tab) схему фиксации вместо классических рельсов: кубсат имеет специальные выступы-табы, которые зажимаются стенками контейнера. Это создаёт более жёсткую и предсказуемую передачу вибрационных нагрузок. CSD поддерживает 3U, 6U и 12U, обеспечивает электрический интерфейс для зарядки и связи до отделения, а также имеет моторный привод открытия двери, позволяющий многократное тестирование без расходных материалов. Другие распространённые деплойеры – ISIPOD (ISIS), EXOpod (Exolaunch), NLAS (Tyvak), различные версии JAXA J-SSOD и др. – используют либо рельсовую, либо табовую схему, либо их комбинацию.

Для обеспечения безопасного и контролируемого отделения применяются подпружиненные шток-толкатели (spring plungers / separation springs). Согласно CDS, сила пружины не должна превышать примерно 6,7 Н, а ход – быть не менее 2,5 мм. Слишком мощная пружина может вызвать непредсказуемую динамику и риск повторного контакта с соседними аппаратами; слишком слабая – недостаточное разведение. Типичное расположение – на торце –Z (сторона, входящая в деплойер первой). Пружины обеспечивают начальный импульс разделения стека кубсатов внутри одного контейнера.

Критически важными элементами безопасности являются микровыключатели развёртывания (deployment / inhibit switches). Они располагаются на концах рельсов (±Z) и удерживаются в нажатом состоянии стенками или соседними аппаратами, пока кубсат находится внутри деплойера. До момента полного выхода из контейнера все электрические системы (особенно передатчики и двигатели) должны оставаться обесточенными. CDS требует минимум одного такого выключателя; на практике часто используют два или более для резервирования. После

отделения выключатели размыкаются, разрешая включение бортовых систем. Дополнительно применяются «remove-before-flight» штыри и другие ингибиторы для наземных операций.

Механика разделения должна гарантировать отсутствие столкновений, минимальные угловые скорости закрутки и соблюдение требований по предотвращению образования космического мусора. Современные деплойеры обеспечивают скорости отделения порядка 1–2 м/с и позволяют проводить полномасштабные наземные испытания в условиях микрогравитации или на специальных стендах.

Таким образом, скелет кубсата – это не просто «коробка», а тщательно стандартизированная механическая система, в которой каждый миллиметр габарита, каждый микрон шероховатости рельса и каждый ньютон силы пружины напрямую влияют на успех миссии. Эволюция от простых 1U/3U алюминиевых рам к сложным 12U/16U гибридным конструкциям с табовыми интерфейсами отражает общий тренд: кубсаты перестали быть исключительно учебными аппаратами и превратились в полноценные инструменты научных, коммерческих и технологических задач, сохраняя при этом жёсткую совместимость с глобальной инфраструктурой запуска.

2. Внутренняя топология и анатомическая компоновка

Внутренняя топология кубсата определяет, каким образом отдельные электронные модули, полезные нагрузки и механизмы размещаются внутри ограниченного объёма стандартизированного каркаса, как они электрически и механически соединяются между собой и как обеспечивается баланс масс, жёсткости и функциональности. В отличие от крупных космических аппаратов, где компоновка может быть относительно свободной, в кубсате каждый кубический сантиметр и каждый грамм имеют критическое значение. «Анатомическая» аналогия здесь особенно уместна: каркас играет роль скелета, стек плат – роль позвоночника и нервной системы, а распределение масс и моменты инерции определяют «осанку» и динамическое поведение аппарата. Ниже рассматриваются три взаимосвязанных аспекта: межплатная интеграция, центровка с плотностью упаковки и физическая интеграция полезных нагрузок.

Межплатная интеграция: стандарт PC/104, стек стековых разъёмов и бескабельные шинные кросс-платы (Backplanes)

Исторически доминирующей архитектурой внутренней электрической и механической интеграции кубсатов стал стандарт PC/104 (точнее, его космическая адаптация). PC/104 изначально разрабатывался для промышленных встраиваемых компьютеров и предполагает платы размером примерно 90 × 96 мм с четырьмя крепёжными отверстиями в углах и 104-контактным стековым разъёмом (обычно 2 мм шаг, четыре ряда). В кубсатах платы нанизываются на четыре продольные шпильки (threaded rods), а электрическое соединение осуществляется через длинные штыревые разъёмы, которые проходят через всю стопку. Такой подход обеспечивает высокую плотность монтажа, относительную простоту сборки и широкую совместимость коммерческих модулей (OBC, EPS, ADCS, радиомодули) от разных производителей.

Однако классический PC/104-стек имеет существенные ограничения. Длинные штыри создают паразитные индуктивности и ёмкости, ухудшают маршрутизацию высокоскоростных сигналов, усложняют разборку (для замены одной платы часто приходится разбирать весь стек) и увеличивают риск механических повреждений при вибрации. Кроме того, фиксированная распиновка 104 контактов ограничивает распределение линий питания, шин данных (I^2C, SPI, CAN, UART) и специальных сигналов.

В ответ на эти ограничения всё большее распространение получают архитектуры на основе backplane (кросс-платы, или объединительной платы). В backplane-подходе платы устанавливаются перпендикулярно или параллельно общей печатной плате-шине, соединяясь через краевые разъёмы (edge-card connectors) или миниатюрные высокоплотные коннекторы. Примеры реализации:

- Bus Connector Card (BCC) с несколькими 120-контактными краевыми разъёмами, позволяющими платам «въезжать» вдоль направляющих и подключаться независимо;
- программируемые backplane с CPLD/FPGA, которые позволяют программно маршрутизировать сигналы между подсистемами и полезной нагрузкой;
- гибридные решения, где несколько PC/104-стеков соединяются через общую кросс-плату, транслирующую различные распиновки питания и шин.

Преимущества backplane очевидны: модульность (плата может быть извлечена без разборки остальной системы), лучшая целостность сигналов (короткие трассы), упрощение интеграции полезных нагрузок и возможность масштабирования на 6U/12U/16U. Недостатки – необходимость разработки собственной объединительной платы и потенциально большая занимаемая площадь. В современных проектах часто комбинируют оба подхода: критичные подсистемы (OBC + EPS) остаются в PC/104-стеке, а полезная нагрузка и периферия подключаются через backplane или гибкие шлейфы.

Дополнительно применяются бескабельные решения на основе гибких печатных плат (flex-rigid), M.2-подобных коннекторов и даже экспериментальных высокоскоростных оптических линий связи. Цель всегда одна – минимизировать количество жгутов, которые являются одним из главных источников отказов и источником электромагнитных помех.

Центровка и плотность упаковки: распределение масс, тензор инерции и ограничения по жесткости

Плотность упаковки в кубсате достигает экстремальных значений: в объёме 1–12 литров необходимо разместить источники питания, вычислители, датчики, актюаторы, полезную нагрузку и механизмы развёртывания, сохранив при этом совместимость с деплойером и управляемость на орбите.

Ключевым требованием CDS является положение центра масс (Center of Mass / Center of Gravity). Согласно Rev. 14.1, смещение центра масс относительно геометрического центра не должно превышать:

- ±2 см по осям X и Y для всех форм-факторов до 3U;
- по оси Z – ±2 см (1U), ±3 см (1,5U), ±4,5 см (2U), ±7 см (3U);
- для 6U – ±4,5 см (X), ±2 см (Y), ±7 см (Z);

- для 12U – ±4,5 см по всем осям (с вариациями у отдельных деплойеров).

Эти ограничения обусловлены необходимостью предсказуемой динамики отделения и минимизации возмущающих моментов. На практике положение центра масс рассчитывается в CAD-моделях с учётом реальных плотностей материалов, жгутов, клеёв и конформного покрытия, а затем проверяется экспериментально (часто с помощью специальных весов или торсионного маятника).

Не менее важным является тензор инерции (момент инерции относительно главных осей и произведения инерции). Тензор инерции напрямую влияет на:

- эффективность систем ориентации (реакционные колёса, магнитометры, thrusters);
- устойчивость к гравитационному градиенту и аэродинамическому торможению;
- динамику отделения и начальную закрутку.

Произведения инерции ($I_x y, I_x z, I_y z$) желательно минимизировать, чтобы главные оси инерции совпадали с осями аппарата. Это достигается симметричным размещением тяжёлых элементов (аккумуляторы, двигатели-маховики) относительно центра масс.

Ограничения по жесткости связаны с требованиями к собственным частотам конструкции. Чтобы избежать резонанса с вибрациями ракеты-носителя, первая собственная частота кубсата в закреплённом состоянии (внутри деплойера) должна, как правило, превышать 70–100 Гц (конкретные значения зависят от ракеты и деплойера; типичный диапазон возбуждения – 20–120 Гц). Для продольного направления часто требуют >100 Гц, для поперечного – >50 Гц. Достижение таких частот обеспечивается:

- использованием жёстких алюминиевых или композитных каркасов;
- установкой промежуточных перегородок и рёбер жёсткости;
- правильным выбором диаметра и материала шпилек PC/104;
- минимизацией консольных масс.

Анализ проводится методами конечных элементов (модальный анализ, случайная вибрация по спектрам NASA GEVS или ECSS). Результаты модального анализа часто показывают, что первые формы – изгибные, а напряжения концентрируются в районе крепёжных шпилек и стыков рельсов.

Плотность упаковки также диктует тепловые и электромагнитные ограничения: тепловыделяющие элементы (процессоры, DC/DC-преобразователи) размещают ближе к радиационным поверхностям, чувствительные датчики – подальше от источников помех, а аккумуляторы – в зоне с наиболее стабильной температурой.

Физическая интеграция полезных нагрузок: оптико-электронные модули, АФАР и разворачиваемые механизмы

Полезная нагрузка – «орган чувств» и «рабочий инструмент» кубсата – интегрируется с учётом жёстких ограничений по объёму, массе, полям зрения, тепловым режимам и электромагнитной совместимости.

Оптико-электронные модули (камеры, спектрометры, лидары) требуют:

- жёсткого крепления с минимальными термодеформациями (часто используют инваровые или титановые кронштейны);
- точного выставления оптической оси относительно осей аппарата;
- защиты от загрязнения при дегазировании и от прямой солнечной засветки;
- теплового контроля (иногда с использованием фазопереходных материалов или активных нагревателей).

Активные фазированные антенные решётки (АФАР) и другие высокочастотные полезные нагрузки предъявляют дополнительные требования к точности позиционирования излучателей, к экранированию и к минимизации влияния конструкции на диаграмму направленности. В 6U/12U-форм-факторах АФАР часто размещают на одной из больших граней или на разворачиваемых панелях.

Разворачиваемые механизмы – один из наиболее критичных элементов «анатомии» кубсата. К ним относятся:

- солнечные панели (body-mounted + deployable);
- антенны (диполи, патч-антенны, рупорные, спиральные, разворачиваемые «рулетки»);
- штанги магнитометров, датчиков горизонта, thrusters;
- тормозные паруса (drag sails) для сведения с орбиты.

Механизмы фиксации и освобождения (Hold-Down and Release Mechanisms, HDRM) должны надёжно удерживать элементы в сложенном состоянии при вибрациях запуска и надёжно освобождать их на орбите. Наиболее распространённые решения:

1. Сгораемые чеки (burn-wire / nichrome wire). Нихромовая или металлоплёночная проволока нагревается током и перерезает удерживающую нить (обычно Dyneema, Vectran или капрон). Преимущества – простота, малая масса, низкая стоимость. Недостатки – одноразовость, риск короткого замыкания или запутывания нити, образование продуктов сгорания.

2. Механизмы на основе нитинола (NiTi Shape Memory Alloy). Нитинол используется в виде проволоки, пружин или шарниров. При нагреве выше температуры перехода материал «вспоминает» заданную форму и либо освобождает фиксатор (pin-puller), либо сам разворачивает панель. Преимущества – многоразовость (возможность наземных испытаний), отсутствие пиротехники и мусора, низкий удар. Недостатки – потребление энергии на нагрев и необходимость точного термоконтроля.

3. Пружинные и торсионные шарниры в сочетании с фиксаторами. Пружинные и торсионные шарниры в сочетании с фиксаторами остаются одним из самых распространённых и отработанных решений для развёртывания солнечных панелей, антенн и других элементов на кубсатах. После освобождения чеки, тросовой стяжки или фиксатора на основе сплава с памятью формы (SMA) накопленная энергия предварительно сжатых или закрученных пружин приводит панель в рабочее положение. В условиях жёстких ограничений по объёму и массе такие механизмы привлекательны своей простотой: они не требуют электрической

мощности в момент развёртывания, содержат минимум подвижных деталей и имеют большой накопленный полётный опыт. Вместе с тем именно на кубсатах проявляются специфические особенности, которые приходится учитывать при проектировании.

Во-первых, энергия пружины должна быть достаточной, чтобы преодолеть силы трения, возможные залипания после вибрационных и термоциклических испытаний, а также сопротивление кабелей и шлейфов, проходящих через шарнир. В то же время избыточная энергия приводит к сильному удару в конце хода, который может повредить солнечные элементы, паяные соединения или сам каркас. Поэтому почти всегда применяют демпферы, вязкоупругие элементы или механические ограничители угла, которые гасят скорость в финальной фазе движения. Во-вторых, в вакууме отсутствует воздушное демпфирование, а смазки либо уходят, либо сильно меняют свойства, поэтому подшипники и оси шарниров проектируют либо «сухими», либо с использованием космических смазочных материалов, сохраняющих работоспособность в широком диапазоне температур. В-третьих, после развёртывания панель должна надёжно зафиксироваться в конечном положении: обратный ход под действием вибраций, остаточных напряжений или аэродинамических моментов на низкой орбите недопустим. Для этого используют защёлки, клиновые фиксаторы или дополнительные пружинные стопоры.

Отдельно учитывают влияние циклов изменения температуры (термоциклирования). Различные коэффициенты линейного расширения материалов пружины, оси, втулки и панели могут приводить к изменению момента трения и даже к заклиниванию. Поэтому предпочитают материалы с близкими тепловыми характеристиками и закладывают конструктивные люфты, сохраняющие подвижность в горячем и холодном состоянии. Наконец, сам момент освобождения фиксатора должен быть синхронизирован с общей логикой отделения и включения питания: слишком раннее развёртывание внутри деплойера катастрофично, слишком позднее – может оставить аппарат с недобором мощности на первых витках. Всё это делает даже такой, казалось бы, простой механизм предметом тщательного расчёта, наземных испытаний в вакууме и термокамере и многократной проверки последовательности операций.

4. Гибридные решения (pogo-pin + burn-wire, SMA + пружина). Гибридные решения сочетают несколько физических принципов в одном компактном узле и поэтому особенно востребованы на кубсатах, где каждый грамм и каждый кубический сантиметр на счету. Наиболее характерные связки – pogo-pin с пережигаемой проволокой (burn-wire) и сплав с памятью формы (SMA) с пружиной.

Pogo-pin в таких схемах выполняет сразу несколько функций. Подпружиненный контакт обеспечивает электрическое соединение между корпусом и откидываемой панелью до момента развёртывания, передавая телеметрию или команды. В то же время сама пружина pin’a создаёт усилие, которое после освобождения фиксатора помогает начать движение панели или полностью обеспечивает малый ход отделения. Наконец, размыкание контакта служит простым и надёжным датчиком факта развёртывания: бортовой компьютер видит

исчезновение цепи и фиксирует успешное выполнение операции. Пережигаемая проволока, удерживающая панель, требует лишь короткого импульса тока и занимает минимум места, что идеально соответствует энергетическим и объёмным ограничениям кубсата. Важный практический момент – необходимость гарантированного пережигания в вакууме и при низких температурах, а также защита соседних элементов от горячих продуктов и обрывков проволоки.

Связка SMA-элемента с пружиной работает иначе. Проволока или пружина из нитинола при нагреве током возвращается к заранее заданной форме и освобождает основной силовой элемент – обычную пружину или торсион, который уже выполняет основную работу по развёртыванию. SMA здесь выступает в роли компактного и относительно мощного актуатора одноразового действия, а основную энергию движения запасает классическая пружина. Для кубсатов это удобно тем, что ток нагрева можно сделать небольшим и коротким, а сам SMA-элемент легко интегрируется в плотные компоновки. Вместе с тем приходится учитывать замедление срабатывания SMA на холоде, необходимость хорошей теплоизоляции от соседних компонентов и контроль тока, чтобы не перегреть окружающие материалы.

В обоих случаях гибридный подход позволяет уменьшить число отдельных механизмов, снизить массу и упростить электрическую схему. Цена такого удобства – более тщательная отработка последовательности срабатывания, проверка работоспособности после вибрационных и термоциклических испытаний и обязательное подтверждение того, что отказ одного элемента (например, неполный пережог или недостаточный нагрев SMA) не приводит к невозможности развёртывания. Именно поэтому на этапе квалификации гибридные узлы испытывают в условиях, максимально близких к полётным: вакуум, крайние температуры, имитация реальной последовательности команд.

После развёртывания механизмы должны обеспечивать достаточную жёсткость (чтобы панели не вибрировали под действием градиента гравитации или аэродинамики) и, при необходимости, возможность подстройки ориентации (Solar Array Drive Assembly – SADA).

Интеграция разворачиваемых элементов требует тщательного анализа кинематики, зазоров в сложенном состоянии (не более 6,5 мм за плоскостью рельсов), последовательности развёртывания (чтобы антенны и панели не мешали друг другу) и резервирования (часто ставят два независимых burn-wire или SMA-канала).

Таким образом, внутренняя топология и «анатомическая» компоновка кубсата представляют собой сложный компромисс между стандартизацией (PC/104), модульностью (backplane), динамическими требованиями (центр масс, тензор инерции, собственные частоты) и функциональностью полезной нагрузки. Успешная компоновка превращает набор отдельных плат и механизмов в целостный «организм», способный выдержать нагрузки запуска, корректно отделиться, развернуть все необходимые системы и выполнить научную или прикладную задачу в условиях космического пространства.

3. Физические магистрали и интерфейсы

Физические магистрали кубсата – это «кровеносная» и «тепловая» системы аппарата. Они обеспечивают передачу электрической энергии, данных и тепла между подсистемами, полезными нагрузками и внешними элементами (солнечными панелями, антеннами, датчиками). В условиях глубокого вакуума, резких температурных перепадов, вибраций запуска и радиации обычные наземные решения неприменимы. Поэтому проектирование кабельной сети и тепловых мостов требует специальных материалов, строгих правил экранирования, контроля газовыделения и обеспечения надёжного теплового контакта. Ниже подробно рассматриваются оба аспекта.

Кабельная сеть и коммутация: жгуты, экранирование от ЭМП, вакуум устойчивая изоляция

Кабельная сеть (harness) в кубсате представляет собой туже совокупность проводов, разъёмов, экранов, термоусадочных трубок и крепёжных элементов, которая обеспечивает электрические соединения между платами, модулями и внешними устройствами, что и в любом другом устройстве. Несмотря на сильное стремление минимизировать жгуты за счёт стековых шин PC/104, backplane-разъёмов и плотных межплатных соединителей, полностью отказаться от кабелей невозможно. Солнечные панели, антенны, разворачиваемые конструкции, выносные датчики, механизмы отделения и интерфейсы с деплойером требуют гибких переходов, способных работать после многократных изгибов, вибраций и термоциклов.

На кубсатах к кабельной сети предъявляются особенно жёсткие требования. Во-первых, каждый лишний грамм и каждый лишний кубический сантиметр критичны, поэтому используют провода минимально допустимого сечения, часто с высокопрочной полиимидной или PTFE-изоляцией, а вместо громоздких разъёмов – компактные микроразъёмы стандартов Molex, Harwin, Omnetics или космические аналоги SMA/SMP для ВЧ-трактов. Во-вторых, в вакууме недопустимы материалы с высоким газовыделением: все провода, трубки, заливки и маркеры должны удовлетворять критериям TML и CVCM. В-третьих, жгуты подвергаются интенсивной вибрации при запуске и многократному циклу смены температур на орбите, поэтому их тщательно фиксируют каповыми нитями, фторопластовыми стяжками или клеями, исключающими перемещение и перетирание изоляции. Особое внимание уделяют местам перехода на подвижные элементы – солнечные панели и антенны: здесь применяют спиральную укладку, сервисные петли и гибкие шлейфы, рассчитанные на заданное число циклов раскрытия и последующей работы.

Отдельной практической задачей является обеспечение электромагнитной совместимости. Силовые линии питания, высокочастотные фидеры и чувствительные сигнальные цепи датчиков ADCS приходится разносить, экранировать и правильно заземлять, чтобы токи солнечных панелей и импульсы передатчиков не наводили помехи на магнитометры и гироскопы. Наконец, кабельная сеть должна сохранять работоспособность после

развёртывания: обрыв или короткое замыкание в жгуте панели часто означает потерю значительной части энергобаланса или канала связи. Поэтому на этапе сборки и испытаний жгуты проверяют на целостность, сопротивление изоляции и правильность распиновки как в сложенном, так и в раскрытом состоянии аппарата. Всё это превращает, казалось бы, вспомогательную кабельную сеть в полноценный элемент конструкции, от качества которого напрямую зависит надёжность всего кубсата.

Материалы изоляции и требования к устойчивости в вакууме.

В кабельных сетях и электрических соединениях кубсатов изоляция проводов и жгутов должна одновременно удовлетворять нескольким жёстким требованиям: почти не выделять летучих веществ в вакууме, сохранять электрическую прочность после больших доз радиации, работать в широком диапазоне температур и по возможности сопротивляться эрозии атомарным кислородом на низких орбитах. Именно поэтому выбор ограничивают несколькими хорошо изученными полимерами.

Основными изоляционными материалами являются полиимид (Kapton), фторопласты (PTFE/Teflon, FEP, ETFE) и иногда PVDF (Kynar). Эти материалы обладают:

- чрезвычайно низким газовыделением (TML ≤ 1,0 %, CVCM ≤ 0,1 % по ASTM E595);
- высокой радиационной стойкостью (Kapton выдерживает сотни Мрад);
- широким температурным диапазоном (от –200 °C до +200 °C и выше);
- устойчивостью к атомарному кислороду (особенно важно для VLEO).

Полиимид (Kapton) стал фактическим стандартом для многих космических применений, включая кубсаты. Он сочетает очень низкое газовыделение (уверенно укладывается в критерии TML ≤ 1 % и CVCM ≤ 0,1 % по ASTM E595) с выдающейся радиационной стойкостью – материал сохраняет механические и электрические свойства после сотен мегарад. Температурный диапазон эксплуатации простирается примерно от –200 °C до +200 °C и выше, что перекрывает почти все режимы, встречающиеся на LEO. Kapton используют не только как изоляцию проводов, но и в виде плёнок для терморегулирующих покрытий, подложек гибких шлейфов и защитных слоёв. На очень низких орбитах его поверхность подвержена эрозии атомарным кислородом, поэтому внешние открытые участки часто дополнительно защищают тонкими неорганическими покрытиями или металлизацией. Внутри аппарата, где потока атомарного кислорода нет, Kapton работает без ограничений и остаётся одним из самых надёжных решений.

Фторопласты – PTFE (классический тефлон), FEP и ETFE – образуют вторую основную группу. PTFE обладает почти идеальными диэлектрическими свойствами, чрезвычайно химически инертен и тоже имеет низкое газовыделение. Его основной недостаток – относительно высокая жёсткость и склонность к холодной текучести, поэтому в чистом виде он реже применяется для тонких гибких проводов. FEP и ETFE более технологичны: их легче экструдировать на тонкие жилы, они сохраняют гибкость и хорошо переносят

термоциклирование. Все три материала устойчивы к радиации на уровнях, типичных для LEO-миссий кубсатов, и работают в широком температурном диапазоне. К атомарному кислороду фторопласты заметно более стойки, чем многие другие полимеры, хотя при длительном воздействии на VLEO поверхностная эрозия всё же происходит. На практике FEP и ETFE часто выбирают для проводов, которые должны многократно изгибаться при развёртывании панелей и антенн.

PVDF (Kynar) применяется реже, но занимает свою нишу. Он обладает хорошей механической прочностью, удовлетворительным газовыделением и радиационной стойкостью, а также сравнительно устойчив к атомарному кислороду. Иногда его используют там, где нужна более жёсткая изоляция или совместимость с определёнными технологиями разделки и маркировки. По совокупности характеристик PVDF обычно уступает Kapton и ETFE, поэтому остаётся вспомогательным материалом.

Общий практический вывод для разработчика кубсата прост. Для большинства внутренних жгутов и гибких шлейфов оптимальны провода с изоляцией из Kapton или ETFE/FEP: они дают минимальное газовыделение, выдерживают радиацию и термоциклы LEO и сохраняют гибкость. Там, где кабель или плёнка выходит на внешнюю поверхность и может подвергаться потоку атомарного кислорода, либо выбирают более стойкий фторопласт, либо наносят защитное покрытие. Любой материал перед применением должен иметь подтверждённые данные по outgassing, а готовый жгут – пройти проверку после вибрационных и термовакуумных испытаний. Такой подход позволяет кабельной сети оставаться одним из самых надёжных элементов кубсата на протяжении всей миссии.

Экранирование от электромагнитных помех (ЭМП).

В ограниченном объёме кубсата источники помех (DC/DC-преобразователи, цифровые шины, радиопередатчики) находятся в непосредственной близости от чувствительных приёмников, магнитометров и аналоговых датчиков. Поэтому экранирование является обязательным. Основные практики:

- индивидуальное экранирование критичных линий (коаксиальные кабели, экранированные витые пары);
- общее экранирование жгута алюминиевой или медной фольгой, оплёткой (braid) или комбинацией обоих;
- 360-градусное соединение экрана с корпусом разъёма (backshell) для создания непрерывной клетки Фарадея;
- сегментация жгутов по классам ЭМС (силовые, сигнальные, высокочастотные) с физическим разделением;
- использование витых пар для дифференциальных сигналов и линий питания.

Для внешних жгутов (проходящих за пределами основной конструкции) требуется усиленное экранирование, часто с дополнительной обмоткой алюминиевой лентой и защитой

многослойной теплоизоляцией (MLI). Экраны должны быть надёжно заземлены; плохие контакты или «плавающие» экраны могут сами стать источниками помех.

В ограниченном объёме кубсата источники электромагнитных помех и чувствительные цепи оказываются буквально в нескольких сантиметрах друг от друга. Импульсные DC/DC-преобразователи, цифровые шины SPI и I²C, высокоскоростные линии памяти, мощные радиопередатчики и токи солнечных панелей создают широкий спектр помех – от единиц килогерц до гигагерц. Рядом с ними работают магнитометры, способные регистрировать поля в единицы нанотесла, малошумные усилители солнечных и звёздных датчиков, аналоговые цепи АЦП и приёмники слабых сигналов. В таких условиях экранирование кабельной сети перестаёт быть желательной мерой и становится обязательным элементом проектирования.

На практике применяют несколько взаимно дополняющих приёмов. Критичные сигнальные и высокочастотные линии выполняют коаксиальными кабелями или экранированными витыми парами: экран перехватывает электрическую составляющую помехи, а свивка проводов уменьшает площадь петли и, следовательно, наводку от магнитных полей. Общие жгуты дополнительно обматывают алюминиевой или медной фольгой, металлической оплёткой либо комбинацией обоих материалов. Фольга хорошо работает на высоких частотах, оплётка – на более низких и при этом сохраняет гибкость. Чтобы экран действительно выполнял свою роль, его соединяют с корпусом разъёма по всей окружности (360-градусный контакт через backshell). Только такое соединение создаёт непрерывную «клетку Фарадея»; точечное подключение одним проводником на высоких частотах почти бесполезно и иногда даже усиливает помехи.

Важным организационным принципом является сегментация жгутов по классам электромагнитной совместимости. Силовые линии питания, цифровые сигнальные цепи и особо чувствительные аналоговые или высокочастотные линии стараются вести раздельно, с физическим расстоянием между пучками и, по возможности, с разнесением по разные стороны корпуса. Дифференциальные сигналы и даже некоторые линии питания выполняют витыми парами: симметричный сигнал значительно менее чувствителен к синфазным наводкам. Для внешних жгутов, выходящих за пределы основного каркаса к солнечным панелям или антеннам, экранирование усиливают – часто применяют двойную обмотку фольгой и оплёткой, а сверху защищают многослойной экранно-вакуумной изоляцией. Такая конструкция одновременно снижает помехи и улучшает тепловой режим кабеля.

Особое внимание уделяют заземлению экранов. «Плавающий» или плохо соединённый экран сам становится антенной и переизлучает помехи. Поэтому на кубсатах стремятся к однозначной и низкоомной схеме заземления, согласованной с общей концепцией заземления корпуса и плат. Все эти меры проверяют не только расчётом, но и измерениями: на этапе сборки и испытаний контролируют целостность экранов, сопротивление соединений и реальный уровень наводок на магнитометрах и чувствительных аналоговых цепях. Только после подтверждения, что кабельная сеть не превращает собственные помехи аппарата в

ложные сигналы датчиков, можно считать электромагнитную совместимость жгутов обеспеченной.

Конструктивные особенности и надёжность.

Проектирование кабельных жгутов на кубсате начинается с простых, но критичных механических ограничений. В вакууме и при сильной вибрации запуска любой провод, который может свободно перемещаться, со временем перетирает изоляцию о край каркаса или о соседний кабель. Поэтому жгуты укладывают с соблюдением минимальных радиусов изгиба, фиксируют так, чтобы исключить относительное движение, и защищают в местах возможных контактов с острыми кромками. Гибкость нужна и для сборки: плотная компоновка 3U- или 6U-аппарата часто требует многократной установки и снятия модулей, и жгут не должен мешать этому процессу или повреждаться при нем.

Разъёмы выбирают из числа компактных и проверенных в космосе семейств – Micro-D, Nano-D для сигналов и низких токов, SMA и SMP для радиочастотных трактов. Контакты, как правило, позолочены. Золотое покрытие решает сразу две задачи, особенно важные в вакууме: предотвращает окисление и резко снижает риск холодной сварки одноимённых металлов при вибрации и длительном контакте. Корпуса разъёмов и изоляторы должны иметь подтверждённое низкое газовыделение, иначе они сами станут источником загрязнения оптики и покрытий.

Крепление жгутов выполняют материалами, которые сохраняют свойства в вакууме и при многочисленных циклах смены температур. Обычные нейлоновые стяжки для этого не подходят – они выделяют газы и теряют прочность. Вместо них используют стяжки из PEEK или ETFE, ленту Kapton и специальные клипсы. Все соединения после монтажа проверяют на целостность цепей и сопротивление изоляции. На высокочастотных линиях, работающих при заметной мощности, дополнительно оценивают риск multipaction – резонансного вторично-электронного пробоя в вакууме. Если геометрия разъёма или зазора создаёт условия для multipaction, линию либо перепроектируют, либо снижают мощность, либо заполняют опасный объём диэлектриком.

Силовые линии рассчитывают особенно внимательно. В вакууме нет конвекции, поэтому единственные пути отвода тепла от провода – теплопроводность по меди и излучение с поверхности. Сечение выбирают с запасом не только по допустимому току, но и по температуре изоляции в этих условиях. На практике это часто означает более толстый провод, чем казался бы достаточным «по земле». Для радиочастотных трактов применяют специальные космические коаксиалы с низкой погонной потерей и стабильной фазовой характеристикой в рабочем диапазоне температур. Любой лишний децибел потерь в фидере напрямую уменьшает запас радиолинии, поэтому длину таких кабелей стремятся минимизировать, а число разъёмов – сократить до необходимого минимума.

В совокупности эти правила превращают кабельную сеть из простого набора проводов в элемент, который должен сохранять электрическую и механическую целостность после вибраций выведения, многочисленных термоциклов и, в случае панелей и антенн, после развёртывания. Именно поэтому отработка жгутов на кубсате включает не только проверку распиновки, но и испытания в составе аппарата в термокамеры и на вибростенде. Таким образом, кабельная сеть кубсата – это не просто «провода», а тщательно спроектированная система, в которой каждый материал, каждый экран и каждое соединение влияют на электромагнитную совместимость, надёжность и срок службы аппарата.

Тепловые мосты: теплоотводящие подложки, интерфейсные пасты и гибкие теплоотводящие ленты

В вакууме отсутствует конвекция – перенос тепла потоками газа или жидкости, – поэтому внутренний теплообмен в кубсате целиком опирается на теплопроводность по твёрдым телам и на тепловое излучение. Излучение эффективно сбрасывает тепло только с внешних поверхностей, обращённых в космическое пространство. До этих поверхностей тепло от процессоров, усилителей мощности, аккумуляторов и DC/DC-преобразователей должно быть доставлено именно теплопроводностью. Если этого пути нет или он имеет слишком большое тепловое сопротивление, компонент быстро перегревается, даже когда его собственная рассеиваемая мощность составляет всего несколько ватт.

Тепловые мосты (thermal straps, thermal links) как раз и создают такой путь. Их изготавливают из материалов с высокой теплопроводностью – меди, алюминия или пиролитического графита (в том числе в виде гибких многослойных лент). Один конец моста плотно прижимают или приклеивают теплопроводным клеем к корпусу горячего компонента или к его теплоотводящей пластине, другой – к каркасу, к специальной тепловой шине или непосредственно к радиационной панели. Цель – минимизировать суммарное тепловое сопротивление цепи «источник – мост – радиатор».

На кубсатах к тепловым мостам предъявляются дополнительные жёсткие требования. Они должны быть лёгкими и занимать минимум объёма, сохранять гибкость, если соединяют подвижные или разъёмные модули, и не создавать избыточных механических напряжений при циклах изменения температуры. Поэтому часто используют плетеные медные или графитовые ленты, которые компенсируют разницу тепловых расширений и небольшие смещения плат. Место контакта критично: даже тонкий слой воздуха или неровность поверхности резко увеличивают сопротивление, поэтому применяют термопасты с низким газовыделением, индиевые прокладки или прецизионную механическую прижимную оснастку. После установки моста проверяют, что он не мешает разъёмам, жгутам и механизмам развёртывания и что его собственная жёсткость не передаёт вредные вибрации на чувствительные элементы.

Без продуманной сети тепловых мостов локальный перегрев электроники на орбите становится почти неизбежным. Излучение с поверхности небольшого корпуса микросхемы или модуля способно отвести лишь доли ватта при допустимом перепаде температур. Всё, что сверх этого, должно быть уведено кондуктивно. Именно поэтому грамотное проектирование

тепловых связей между тепловыделяющими элементами, каркасом и радиационными поверхностями является обязательным условием работоспособности энергосистемы, бортового компьютера, передатчика и полезной нагрузки кубсата в условиях космического вакуума.

Теплопроводящие подложки и интерфейсные материалы.

На уровне печатных плат и корпусов компонентов основное термическое сопротивление часто возникает не в самом материале радиатора или каркаса, а в месте контакта двух поверхностей. Даже хорошо обработанные плоскости реально касаются друг друга лишь в отдельных точках; остальное пространство заполнено воздухом или вакуумом, и тепло через него почти не проходит. Теплопроводящие прокладки (thermal pads, gap fillers) и термопасты (thermal interface materials, TIM) заполняют эти микронеровности и создают непрерывный теплопроводящий путь. Без них даже мощный тепловой мост или толстая алюминиевая стенка не смогут эффективно охладить процессор или усилитель.

Требования к ним:

- низкое газовыделение;
- стабильность свойств в диапазоне температур –40…+80 °C и выше;
- достаточная эластичность, чтобы компенсировать термомеханические деформации;
- совместимость с материалами плат и радиаторов.

Часто применяются материалы на основе силикона, наполненного оксидами металлов или керамикой, а также современные графеновые и углеродные TIM. В критичных местах (мощные процессоры, СВЧ-усилители) используют металлические индиевые или золотые фольги, которые обеспечивают минимальное сопротивление, но требуют высокого контактного давления.

В условиях кубсата к таким материалам предъявляются требования, которых нет в обычной наземной электронике. Они должны иметь подтверждённое низкое газовыделение, иначе в вакууме из них будут выходить летучие вещества, загрязняющие оптику и покрытия. Свойства обязаны сохраняться во всём диапазоне рабочих температур – как правило, от минус 40 °C и ниже до плюс 80 °C и выше, – и не деградировать после сотен термоциклов. Материал должен оставаться достаточно эластичным, чтобы компенсировать разницу теплового расширения платы, корпуса микросхемы и радиатора, не растрескиваясь и не теряя контакта. Наконец, он не должен вызывать коррозию контактирующих металлов и обязан быть совместим с технологией сборки.

На практике чаще всего применяют силиконовые составы, наполненные оксидами металлов или керамическими частицами. Они относительно дешевы, хорошо заполняют зазоры и имеют приемлемое газовыделение при правильном выборе марки. В более требовательных местах используют современные материалы с графеном или другими углеродными наполнителями, которые дают более высокую теплопроводность при той же толщине. Для наиболее критичных

компонентов – мощных процессоров, СВЧ-усилителей, ключевых элементов энергопреобразователей – иногда ставят мягкие металлические фольги из индия или золота. Они обеспечивают самое низкое контактное сопротивление, но требуют значительного и равномерного прижимного усилия, а также чистых, ровных поверхностей. В вакууме индий дополнительно удобен тем, что не окисляется и хорошо «прирабатывается» к поверхности.

Ошибки при выборе или нанесении TIM на кубсате проявляются уже на орбите. Слишком жёсткая прокладка не заполняет неровности, слишком мягкая со временем выдавливается, материал с высоким газовыделением загрязняет соседние поверхности, а недостаточный прижим металлической фольги сводит её преимущество на нет. Поэтому термоинтерфейсы рассматривают как полноценный элемент тепловой конструкции: их выбирают по результатам расчёта, проверяют на outgassing, учитывают в модели теплового режима и контролируют качество монтажа при сборке. Только при таком подходе удаётся удержать температуру критичных компонентов в допустимых пределах на протяжении всей миссии.

Гибкие теплоотводящие ленты (thermal straps).

Когда жёсткая тепловая связь между компонентом и радиатором невозможна или нежелательна, применяют гибкие тепловые мосты. Причины бывают разными: нужно развязать чувствительный прибор от вибраций каркаса, компенсировать большую разницу коэффициентов теплового расширения, сохранить возможность демонтажа модуля или просто проложить тепловой путь в обход уже занятого объёма. В этих случаях гибкий элемент должен одновременно хорошо проводить тепло и не передавать механические нагрузки.

Классические варианты:

- медные или алюминиевые плетёные/фольговые ленты (braided copper/aluminum straps);
- многослойные пакеты из тонкой фольги.
- В современных кубсатах всё шире используются высокоэффективные углеродные материалы:
- пиролитический графит (PGS – Pyrolytic Graphite Sheet) с теплопроводностью в плоскости до 1500–1800 Вт/(м·К);
- графитовые волокна и графеновые композиты;
- специальные конструкции типа GFTS (Graphite Fiber Thermal Straps).

Эти материалы при той же массе обеспечивают теплопроводность в несколько раз выше, чем медь или алюминий, и обладают высокой гибкостью. Они особенно эффективны для охлаждения оптических датчиков, стар-трекеров, мощных электронных модулей и аккумуляторных сборок. Концы теплоотводящих элементов обычно заканчиваются металлическими наконечниками (end blocks), которые крепятся к источнику тепла и к радиатору болтами или зажимами с контролируемым усилием.

Классическим решением остаются плетёные или фольговые ленты из меди и алюминия. Медная оплётка обладает высокой теплопроводностью и хорошо переносит многократные изгибы, алюминиевая – легче и часто достаточна по эффективности. Многослойные пакеты из тонкой фольги позволяют нарастить сечение и при этом сохранить гибкость. Такие мосты относительно дёшевы, хорошо изучены и широко применяются на кубсатах для отвода тепла от преобразователей, усилителей и аккумуляторных сборок. Их главный недостаток – при той же массе они проводят тепло заметно хуже, чем современные углеродные материалы.

Поэтому в новых разработках всё чаще используют пиролитический графит (PGS – Pyrolytic Graphite Sheet) и конструкции на основе графитовых волокон. Теплопроводность PGS в плоскости листа достигает 1500–1800 Вт/(м·К), что в несколько раз выше, чем у меди, при существенно меньшей плотности. Гибкие графитовые ленты и готовые тепловые мосты типа GFTS (Graphite Fiber Thermal Straps) позволяют отводить заметные потоки тепла при минимальной массе и высокой податливости. Это особенно ценно для охлаждения стар-трекеров, оптических датчиков, мощных процессорных модулей и плотных аккумуляторных сборок, где каждый грамм на счету, а жёсткая связь могла бы внести недопустимые термомеханические напряжения или вибрации.

Концы таких мостов почти всегда заканчиваются металлическими наконечниками (end blocks) из меди или алюминия. Наконечники обеспечивают равномерный прижим к поверхности источника тепла и к радиатору, а также позволяют использовать обычные болтовые или пружинные соединения с контролируемым усилием. От качества этого контакта зависит итоговая эффективность всего моста: даже самый теплопроводный графит не поможет, если на границе останется воздушный зазор или слабый прижим. Поэтому при сборке контролируют чистоту поверхностей, момент затяжки и, при необходимости, применяют тонкие слои термоинтерфейсных материалов с низким газовыделением.

Для разработчика кубсата гибкие тепловые мосты – это инструмент, который позволяет совместить эффективный теплоотвод с механической свободой компоновки. Правильно выбранный и установленный мост удерживает температуру критичных компонентов в допустимых пределах, не нарушая виброизоляции, не создавая лишних напряжений при циклах изменения температуры и не отбирая заметной массы у полезной нагрузки. Именно поэтому их расчёт и отработка входят в обязательную часть теплового проектирования современных аппаратов.

Тепловые трубки и плоские тепловые ремни.

Когда тепловые потоки возрастают до нескольких ватт и выше, а допустимый перепад температур между источником и радиатором остаётся жёстко ограниченным, одних только теплопроводящих мостов из меди или графита становится недостаточно. В этих случаях на

кубсатах – прежде всего на платформах 6U и 12U с мощными полезными нагрузками и разворачиваемыми панелями – применяют миниатюрные тепловые трубки и плоские гибкие тепловые устройства. Тепловая трубка использует фазовый переход рабочей жидкости: в зоне нагрева жидкость испаряется, пар переносит тепло к зоне охлаждения, там конденсируется, а жидкость возвращается обратно по капиллярной структуре. Благодаря этому механизму удаётся передавать заметную мощность при очень малом температурном градиенте.

В кубсатах используют укороченные и уплощённые тепловые трубки толщиной часто менее миллиметра. В качестве корпуса применяют медь или алюминий, рабочей жидкостью чаще всего служат ацетон или вода. Ацетон удобен более широким температурным диапазоном и меньшей склонностью к замерзанию в типичных условиях хранения и выведения, вода даёт высокую эффективность, но требует тщательного контроля температуры, чтобы не допустить замерзания с разрушением капиллярной структуры. Современные миниатюрные трубки способны переносить от нескольких до нескольких десятков ватт при перепаде температур всего в несколько градусов, что делает их незаменимыми для охлаждения мощных процессоров, СВЧ-усилителей и плотных электронных модулей.

Плоские гибкие тепловые ремни, такие как устройства типа FlexCool, сочетают высокую теплопроводность с возможностью изгиба. Они позволяют прокладывать тепловой путь между подвижными или разнесёнными элементами – например, между корпусом и разворачиваемой панелью, которая одновременно служит радиатором. Гибкость важна и при сборке, и при термоциклировании: ремень компенсирует относительные смещения без появления больших механических напряжений. Такие устройства уже имеют подтверждённый полётный опыт и прошли испытания на многократное замораживание и оттаивание, что критично для аппаратов, переживающих длительные теневые участки или наземное хранение при отрицательных температурах.

Для разработчика кубсата применение тепловых трубок и гибких тепловых ремней означает необходимость учитывать несколько практических ограничений. Трубка имеет минимальную длину и радиус изгиба, её нельзя произвольно сгибать после зарядки, а ориентация относительно вектора перегрузки при выведении должна исключать осушение испарителя. Рабочая жидкость и материалы корпуса должны соответствовать требованиям по газовыделению, а места стыковки с источником тепла и радиатором – обеспечивать низкое контактное сопротивление. При выполнении этих условий миниатюрные тепловые трубки и гибкие тепловые ремни становятся одним из самых эффективных инструментов управления высокими тепловыми потоками в ограниченном объёме современного кубсата.

Проектирование и интеграция.

Тепловые мосты никогда не проектируют изолированно. Их параметры сразу включают в общую тепловую математическую модель аппарата, где каждый компонент, участок каркаса, кабель и внешняя поверхность представлены как узлы с собственной теплоёмкостью и связями. Только в такой модели видно, какой реальный перепад температур возникнет между

процессором и радиатором, достаточно ли сечения моста и не появится ли неожиданный «тепловой карман» в другом месте. Особое внимание уделяют контактным сопротивлениям на всех стыках: именно они часто вносят основной вклад в суммарное сопротивление цепи. Даже небольшой воздушный зазор или неравномерный прижим могут свести на нет преимущества высокотеплопроводного материала. Необходимо учитывать:

- контактные сопротивления на всех стыках;
- деградацию свойств материалов под действием радиации и частыми циклическими изменениями температуры;
- влияние крепежа и жгутов на тепловые пути;
- необходимость сохранения гибкости при развёртывании солнечных панелей или антенн.

При расчёте приходится учитывать и долговременные изменения. Радиация и сотни термоциклов постепенно меняют свойства термоинтерфейсных материалов, могут ослаблять прижим крепежа и ухудшать контакт. Жгуты проводов, крепёжные элементы и клеевые швы тоже участвуют в теплообмене – иногда как полезные параллельные пути, иногда как паразитные утечки тепла к чувствительным элементам. Если мост соединяет корпус с разворачиваемой солнечной панелью, он должен оставаться гибким и после раскрытия, не ограничивая движение и не накапливая усталостных повреждений. Все эти факторы закладывают в модель заранее и затем проверяют наземными термовакуумными испытаниями.

В идеале тепловая архитектура кубсата образует непрерывный и по возможности короткий путь: от источника тепла через теплопроводящие элементы и каркас к внешним поверхностям, покрытым материалами с оптимальным отношением коэффициента поглощения к коэффициенту излучения. Чем меньше разрывов и лишних сопротивлений на этом пути, тем ниже температура горячих компонентов при той же рассеиваемой мощности и тем меньше энергии приходится тратить на активный подогрев холодных узлов в тени.

Кабельная сеть и тепловые мосты вместе образуют инфраструктуру, без которой набор отдельных плат и приборов не превращается в единый космический аппарат. Качественно выполненная кабельная сеть обеспечивает электромагнитную совместимость, сохраняет целостность соединений после вибраций и термоциклов и не становится источником загрязнения в вакууме. Эффективные тепловые связи удерживают температуры всех критичных элементов в допустимых пределах при минимальных затратах массы и объёма. Ошибки в любой из этих систем проявляются уже на орбите и, как правило, уже не могут быть исправлены. Поэтому обе магистрали – электрическая и тепловая – проектируют, моделируют и испытывают с тем же вниманием, что и основные функциональные подсистемы кубсата.

Часть II. Физиология кубсата

4. Энергетический метаболизм (Power System – EPS)

Энергетическая система (Electrical Power System, EPS) – это «метаболизм» кубсата. Она обеспечивает генерацию, накопление, преобразование и распределение электрической энергии, без которой невозможна работа ни одной подсистемы. В условиях ограниченного объёма, массы и площади солнечных панелей, а также периодических затенений (eclipse) на низкой околоземной орбите, проектирование EPS представляет собой сложный компромисс между эффективностью, надёжностью, массой и стоимостью. Классическая архитектура EPS кубсата включает три основных блока: генерацию (солнечные панели), накопление (аккумуляторные батареи с системой управления) и распределение/конверсию (шины питания, преобразователи, защита). Ниже эти блоки рассматриваются подробно.

Генерация энергии: фотоэлектрические преобразователи, эффективная площадь, углы инсоляции и факторы деградации

Основным источником энергии на кубсатах служат фотоэлектрические преобразователи (солнечные элементы). Доминирующей технологией на сегодняшний день являются тройные каскадные элементы на основе GaInP/GaAs/Ge (gallium indium phosphide / gallium arsenide / germanium). Эти элементы имеют три p-n-перехода, каждый из которых оптимизирован под свою часть солнечного спектра, что позволяет достигать КПД на начале жизни (Beginning of Life, BOL) 28–32 % в условиях AM0 (космический спектр). Типичные коммерческие ячейки (Azur Space 3G30A, Spectrolab XTJ, SolAero и др.) имеют размеры порядка 4 × 8 см или 2 × 4 см и защищены специальным стеклом (coverglass) толщиной 50–150 мкм для защиты от радиации и микрометеоритов.

Эффективная площадь и углы инсоляции.

Площадь, доступная для размещения солнечных элементов, жёстко ограничена форм-фактором. На 1U-кубсате с body-mounted панелями суммарная площадь элементов редко превышает 300–400 см². На 3U с разворачиваемыми панелями она может достигать 1000–1500 см² и более. Реальная генерируемая мощность зависит от:

- угла падения солнечных лучей (косинусный закон);
- ориентации аппарата (режим sun-pointing или tumbling);
- альбедо Земли и отражённого ИК-излучения (дополнительные несколько процентов);
- температуры панели (с ростом температуры КПД падает примерно на 0,05–0,1 %/°C).

В среднем для 3U-кубсата с разворачиваемыми панелями в LEO ожидаемая средняя мощность составляет 10–30 Вт в зависимости от орбиты и режима ориентации. Для 6U/12U эти значения пропорционально выше.

Факторы деградации.

В космическом пространстве солнечные элементы подвергаются нескольким механизмам деградации:

- радиационное повреждение (электроны и протоны радиационных поясов) – основной фактор на LEO/MEO;
- ультрафиолетовое излучение и атомарный кислород (особенно на высотах ниже 500–600 км);
- термоциклирование и механические напряжения;
- загрязнение поверхностей продуктами outgassing.

Для тройных GaInP/GaAs/Ge-элементов типичная деградация мощности за 1 год на LEO составляет 2–5 %, за 5–7 лет – 10–20 % в зависимости от орбиты и толщины покровного стекла. Средний элемент (GaAs) обычно является наиболее чувствительным к радиации. Моделирование деградации (на основе телеметрии реальных миссий) позволяет прогнозировать мощность на конец жизни (End of Life, EOL) и закладывать соответствующий запас в энергобаланс.

В последние годы наблюдается интерес к возврату кремниевых элементов (в том числе гетероструктурных HJT) из-за существенно меньшей стоимости, однако по удельной мощности и радиационной стойкости они пока уступают тройным каскадам. Для низкобюджетных и короткоживущих миссий кремний может быть оправдан.

Накопление энергии: аккумуляторные батареи, термостабилизация и системы защиты (BMS)

Поскольку кубсат периодически входит в тень Земли (длительность eclipse на LEO обычно 30–35 минут), необходима система накопления энергии. Основными химическими системами аккумуляторов являются литий-ионные (Li-Ion, чаще NMC или NCA) и литий-железо-фосфатные ($LiFePO_4$, LFP).

Сравнение химических систем.

Li-Ion (NMC/NCA): высокая удельная энергоёмкость (150–250 Вт·ч/кг), хорошая доступность в форматах 18650 и pouch. Недостатки – более узкий температурный диапазон зарядки, более высокая чувствительность к перезаряду и глубокому разряду, более быстрая деградация при высоких температурах.

$LiFePO_4$: более высокая безопасность, лучшая циклическая долговечность, более широкий температурный диапазон, меньший риск теплового разгона. Удельная энергоёмкость ниже (90–140 Вт·ч/кг), поэтому для той же ёмкости требуется больший объём и масса.

На низкой околоземной орбите аккумулятор кубсата почти непрерывно работает в режиме коротких циклов: примерно сорок пять минут зарядки на освещённой стороне и тридцать–тридцать пять минут разрядки в тени. За год набираются тысячи таких мелких циклов. Исследования и лётный опыт показывают, что батареи на основе литий-железо-фосфата (LFP) заметно лучше переносят именно такой режим, чем более ёмкие литий-ионные ячейки на основе никеля, марганца и кобальта. У LFP медленнее растёт внутреннее сопротивление, меньше деградирует ёмкость и ниже риск внезапного отказа при длительной работе в условиях частых «мелких» зарядов и разрядов, типичных для LEO.

Типичная конфигурация для 3U – 2–4 последовательно-параллельных ячейки общей ёмкостью 20–60 Вт·ч. Для 6U/12U ёмкость может достигать 100–200 Вт·ч и более.

Термостабилизация ячеек.

Литий-ионные аккумуляторы крайне чувствительны к температуре. Рекомендуемый диапазон зарядки обычно 0…+45 °C, разрядки –20…+60 °C. На LEO температура батареи без специальной терморегуляции может колебаться от –20 °C и ниже в тени до +40…+50 °C на освещённой стороне. Поэтому применяются:

- пассивные меры (теплопроводящие пути к каркасу, размещение батареи в центре аппарата, использование фазопереходных материалов – PCM);
- активные нагреватели (обычно мощностью 1–3 Вт) с термостатным или программным управлением;
- в отдельных проектах – твердотельные PCM на основе оксида ванадия (VO_2) для стабилизации температуры без постоянного потребления энергии.

Перегрев ускоряет рост SEI-слоя и внутреннее сопротивление, а переохлаждение резко снижает доступную ёмкость и может привести к осаждению металлического лития при зарядке.

Система управления батареей (Battery Management System, BMS).

Система управления батареей спутника кубсат, выполняет несколько критических функций:

- балансировка ячеек (passive или active balancing);
- защита от перезаряда (over-voltage protection);
- защита от глубокого разряда (under-voltage protection);
- защита от сверхтока и короткого замыкания;
- мониторинг температуры и отключение при выходе за допустимые пределы;
- оценка состояния заряда (State of Charge, SoC) и состояния здоровья (State of Health, SoH).

В кубсатах система управления батареей часто интегрируется в модуль EPS или выполняется на базе специализированных микросхем с радиационно-толерантным дизайном (или с тройным модульным резервированием для COTS-решений). Современные BMS поддерживают телеметрию по CAN, I^2C или UART и позволяют бортовому компьютеру динамически управлять энергопотреблением.

Распределение и конверсия: топологии шин, MPPT, регулирование напряжения и электронная защита

Сгенерированная солнечными панелями и запасённая в аккумуляторах энергия сама по себе ещё не пригодна для большинства потребителей. Бортовая электроника, датчики, приёмники, передатчики и полезная нагрузка требуют стабильных и, как правило, разных уровней напряжения. Поэтому одна из центральных задач системы электропитания кубсата – преобразовать напряжение батареи в набор регулированных шин и надёжно распределить их по аппарату с защитой от коротких замыканий и отказов отдельных потребителей.

На большинстве кубсатов формируют несколько стандартных шин. Наиболее распространены регулированные линии 3,3 В и 5 В – именно от них питается основная цифровая электроника, микроконтроллеры, память, маломощные датчики и логика интерфейсов. Шину 12 В часто используют для более мощных устройств: некоторых радиопередатчиков, механизмов, отдельных типов полезной нагрузки и иногда для нагревателей. Параллельно почти всегда сохраняют нерегулируемую шину непосредственно от батареи: её напряжение меняется в зависимости от степени заряда и тока нагрузки, зато на ней нет потерь на преобразование, и она удобна для мощных потребителей, способных работать в широком диапазоне входных напряжений. Выбор конкретного набора шин определяется составом потребителей и стремлением минимизировать число преобразований, ведь каждое преобразование уменьшает общий КПД и добавляет тепло.

Преобразование выполняют компактные DC/DC-преобразователи. В условиях кубсата к ним предъявляют жёсткие требования: высокий КПД в широком диапазоне токов, низкий уровень электромагнитных помех, устойчивость к радиации и циклическому изменению температур, минимальные габариты и масса. Импульсные преобразователи при неправильном проектировании становятся мощными источниками помех для магнитометров и чувствительных аналоговых цепей, поэтому их экранируют, фильтруют и размещают с учётом электромагнитной совместимости. Линейные стабилизаторы проще и «чище» по шумам, но при заметном перепаде напряжений выделяют много тепла и снижают КПД, поэтому на кубсатах их применяют ограниченно.

Распределение энергии обязательно сопровождается защитой. Каждый потребитель или группа потребителей подключается через электронный предохранитель (eFuse), токовую защиту или управляемый ключ. Это позволяет отключить короткозамкнутую или отказавшую нагрузку, не обесточивая весь аппарат. Особенно важна защита от тиристорного защёлкивания (latch-up), вызванного радиацией: схема должна быстро обнаружить аномальный рост тока и снять питание с поражённого узла, а после снятия эффекта – дать возможность повторного включения. Управление ключами и контроль токов обычно выполняет либо сам модуль EPS, либо бортовой компьютер через телеметрию.

В итоге цепочка «панель – батарея – преобразователи – защищённые шины» определяет, насколько стабильно и безопасно будет питаться вся электроника кубсата. Ошибки в выборе топологии шин, недостаточный запас по току защиты или плохая фильтрация помех проявляются уже на орбите и могут привести как к потере отдельных приборов, так и к отказу всей миссии. Поэтому архитектуру преобразования и распределения энергии проектируют одновременно с составом потребителей, тепловой моделью и требованиями электромагнитной совместимости.

Топологии питания.

Основные архитектуры энергетических систем (EPS) кубсатов:

- Нерегулируемая шина (unregulated / battery-regulated bus) – батарея подключена непосредственно к основной шине. Напряжение шины «плавает» вслед за напряжением батареи (например, 6–8,4 В для 2S Li-Ion). Преимущества – простота, высокий КПД,

минимум преобразований. Недостаток – все потребители должны выдерживать переменное напряжение или иметь собственные стабилизаторы.

- Регулируемая шина (regulated bus) – между батареей и потребителями стоит DC/DC-преобразователь, поддерживающий постоянное напряжение шины.
- Sun-regulated bus – напряжение регулируется только на освещённой части орбиты.

В современных кубсатах наиболее распространённой стала архитектура, построенная вокруг отслеживания точки максимальной мощности солнечных панелей – Maximum Power Point Tracking (MPPT). Солнечный элемент или панель отдаёт наибольшую возможную мощность только при определённом сочетании напряжения и тока. Эта точка непрерывно смещается: она зависит от угла падения солнечных лучей, температуры панели, частичного затенения и постепенной деградации элементов. Если просто подключить панель к батарее через диод, аппарат будет работать вдали от оптимума и терять заметную долю доступной энергии. MPPT-контроллер постоянно ищет и удерживает точку максимальной мощности, позволяя снимать с панели почти всё, что она способна дать в текущих условиях.

На кубсатах применяют несколько классических алгоритмов. Наиболее простой и широко используемый – Perturb and Observe, когда: контроллер немного меняет рабочее напряжение и смотрит, выросла ли мощность; если выросла, продолжает движение в ту же сторону, если упала – меняет направление. Метод Incremental Conductance опирается на сравнение приращений тока и напряжения и обычно лучше ведёт себя при быстро меняющейся освещённости. В более сложных реализациях используют адаптивные и модельно-ориентированные алгоритмы, которые учитывают температуру и заранее известные характеристики панели. Выбор конкретного метода определяется доступной вычислительной мощностью, скоростью изменения освещённости на данной орбите и требованиями к устойчивости.

Практически важно, что на каждую панель или на группу панелей с близкими условиями освещения часто ставят свой отдельный MPPT-преобразователь. Это может быть понижающий (buck), повышающий (boost) или универсальный buck-boost преобразователь – в зависимости от того, выше или ниже напряжение панели относительно напряжения батареи. Раздельные MPPT позволяют не терять мощность, когда одна панель затенена или ориентирована менее удачно, чем другие. Такая схема особенно эффективна на аппаратах с несколькими фиксированными или разворачиваемыми панелями, работающими в разных тепловых и световых режимах.

Выход MPPT-преобразователей обычно работает на нерегулируемую или частично регулируемую шину, напрямую связанную с аккумуляторной батареей. Напряжение этой шины «плавает» вслед за состоянием заряда батареи, зато отсутствует лишний каскад преобразования и связанные с ним потери. От этой шины уже питаются мощные потребители, способные работать в широком диапазоне входных напряжений, а также последующие стабилизаторы, формирующие точные 3,3 В, 5 В и другие необходимые уровни. В результате архитектура с MPPT даёт максимальный съём солнечной энергии при умеренной сложности и хорошо масштабируется от единиц до десятков ватт, что покрывает потребности большинства современных кубсатов.

Регулирование напряжения.

Типичный набор шин обычно включает следующие варианты:

- нерегулируемая (напряжение батареи);
- 3,3 В (логика, микроконтроллеры, датчики);
- 5 В (многие COTS-модули, USB-подобные интерфейсы);
- 12 В (редко, для некоторых полезных нагрузок или двигателей).

Типичный набор шин питания на кубсате складывается из нескольких уровней, каждый из которых решает свою задачу. Основой почти всегда служит нерегулируемая шина, напрямую связанная с аккумуляторной батареей. Её напряжение меняется в зависимости от степени заряда и тока нагрузки – обычно в диапазоне примерно от 6–8 В в разряженном состоянии до 12–16 В и выше при полном заряде для типовых литий-ионных сборок. На эту шину сажают мощные потребители, способные работать в широком диапазоне входных напряжений: некоторые передатчики, нагреватели, двигательные клапаны и первичные входы последующих преобразователей. Главное достоинство нерегулируемой шины – отсутствие потерь на лишнее преобразование и минимальное число компонентов между батареей и нагрузкой.

От неё или параллельно с ней формируют стабилизированные напряжения. Линия 3,3 В стала стандартом для цифровой логики: от неё питаются микроконтроллеры, память, большинство современных датчиков и интерфейсные схемы. Линия 5 В сохраняет важное значение, потому что значительная часть коммерческих модулей, устаревших, но всё ещё применяемых микросхем и устройств с USB-подобными интерфейсами рассчитана именно на это напряжение. Шину 12 В используют реже – главным образом для отдельных полезных нагрузок, некоторых типов двигателей, механизмов и приборов, изначально спроектированных под автомобильный или промышленный стандарт. Появление каждой дополнительной регулированной шины увеличивает число преобразователей, массу, тепловыделение и сложность, поэтому набор напряжений стараются держать минимально необходимым.

Преобразование выполняют высокоэффективные синхронные DC/DC-преобразователи с типичным КПД 90–95 %. Синхронная топология, в которой диод заменён транзистором, заметно снижает потери, что критично при ограниченном энергобалансе кубсата. От преобразователей требуют не только высокого КПД, но и низкого уровня электромагнитных помех, стабильной работы в широком диапазоне входных напряжений и температур, а также устойчивости к радиационным эффектам. Их размещают так, чтобы короткие силовые проводники и хорошие тепловые связи с каркасом отводили выделяемое тепло.

В более продвинутых архитектурах применяют принцип point-of-load (POL): небольшой стабилизатор ставят непосредственно рядом с потребителем. Это уменьшает потери в длинных проводниках, улучшает качество питания чувствительной электроники и позволяет развести тепловыделение по объёму аппарата вместо концентрации его в одном силовом модуле. На кубсатах POL-преобразователи особенно полезны для процессорных модулей, высокоскоростных интерфейсов и малошумных аналоговых цепей. В итоге грамотно

выбранный набор шин и способов преобразования определяет, насколько полно будет использована энергия солнечных панелей и насколько стабильно будут работать все системы аппарата на протяжении миссии.

Электронные предохранители и защита.

Классические плавкие предохранители в космосе нежелательны (одноразовость, невозможность сброса). Вместо них используются:

- eFuse (electronic fuse) – электронные предохранители с программируемым порогом тока, возможностью удалённого включения/выключения и телеметрией;
- Latch-up current limiters – ограничители тока, защищающие от тиристорного защёлкивания (latch-up) в КМОП-схемах под действием тяжёлых заряженных частиц;
- схемы защиты от обратного тока (чтобы затенённые панели не потребляли энергию от освещённых);
- undervoltage и overvoltage lockout – схемы защиты, которые автоматически отключают питание потребителя или всей шины, если напряжение выходит за допустимые пределы. При слишком низком напряжении (undervoltage) защита не даёт электронике работать в режиме, где она может вести себя непредсказуемо или повредиться, а также предотвращает глубокий разряд аккумулятора. При чрезмерно высоком напряжении (overvoltage) схема размыкает цепь, чтобы не допустить пробоя компонентов. После возвращения напряжения в норму питание, как правило, можно снова включить – либо автоматически, либо по команде бортового компьютера.

Современные модули распределения питания (Power Distribution Module, PDM) позволяют бортовому компьютеру индивидуально включать и отключать потребителей, измерять ток каждого канала и реализовывать приоритетное отключение при дефиците энергии (load shedding).

Энергобаланс и режимы работы.

Проектирование системы электропитания кубсата всегда начинается с расчёта энергобаланса. На этом этапе определяют, сколько энергии в среднем способны дать солнечные панели на выбранной орбите с учётом углов освещения, периодов тени, температуры и ожидаемой деградации, и сколько энергии в среднем потребляют все системы аппарата. Средняя генерация должна уверенно превышать среднее потребление после учёта КПД всех преобразователей, потерь в кабелях и необходимого запаса. Запас нужен не только «на всякий случай»: он покрывает неточности модели, возможное ухудшение ориентации, частичный отказ панелей и увеличение потребления по мере старения электроники. Если баланс сходится только в идеальных условиях, на орбите аппарат быстро окажется в дефиците энергии.

Кубсат почти никогда не работает в одном постоянном режиме. Существует как минимум несколько характерных состояний: Safe Mode с минимальным потреблением, когда сохраняются только приём команд, базовое терморегулирование и минимальная телеметрия; номинальный режим научной или прикладной работы; режимы повышенного потребления, связанные с включением мощной полезной нагрузки, передатчика или двигательной

установки. Система электропитания должна обеспечивать корректный и безопасный переход между этими режимами. При внезапном отказе отдельного канала преобразования или коротком замыкании в нагрузке EPS обязана изолировать неисправный участок и сохранить питание жизненно важных цепей, даже если это означает автоматический переход в Safe Mode.

На практике это реализуется через телеметрию токов и напряжений, управляемые ключи, электронные предохранители и логику, заложенную либо в самом модуле EPS, либо в бортовом компьютере. Алгоритмы следят за состоянием батареи, не допускают глубокого разряда, ограничивают ток заряда при низких температурах и при необходимости принудительно отключают энергоёмкие потребители. Хорошо спроектированная система позволяет операторам на Земле понимать текущий энергобаланс и планировать сеансы связи и работу полезной нагрузки так, чтобы не «посадить» аппарат.

В итоге энергетический метаболизм кубсата представляет собой многоуровневую систему, в которой тесно связаны генерация, накопление, преобразование, распределение и защита. Каждый процент эффективности солнечных элементов, каждый градус температуры батареи, каждый миллиампер, на который точно настроена токовая защита, напрямую влияют на то, сколько дней или лет аппарат сможет выполнять свою задачу. Современные тенденции развития направлены на повышение удельной мощности панелей, увеличение ресурса аккумуляторов при большом числе мелких циклов, внедрение более интеллектуальных систем управления батареей и переход к распределённым архитектурам с высокой степенью отказоустойчивости. Именно качество этой системы во многом определяет, станет ли кубсат короткоживущим демонстратором или полноценным инструментом, способным работать на орбите в течение длительного срока.

5. Гомеостаз и терморегуляция (Thermal Control System – TCS)

Терморегуляция – это система поддержания «гомеостаза» кубсата, то есть стабильных температур всех критических компонентов в условиях экстремальных внешних воздействий. В вакууме отсутствуют конвекция и теплопроводность через воздух, поэтому теплообмен осуществляется только излучением и теплопроводностью по конструкции. На низкой околоземной орбите аппарат каждые ~90 минут переходит из освещённой зоны (где он нагревается прямым солнечным излучением, альбедо и собственным ИК-излучением Земли) в тень (где резко охлаждается, излучая тепло в космическое пространство с температурой ~3 К). Амплитуда температурных колебаний без специальной терморегуляции может превышать 100 °C, что недопустимо для аккумуляторов, оптики, электроники и механизмов. Система терморегулирования (Thermal Control System, TCS) решает эту задачу комбинацией пассивных и активных средств.

Тепловой баланс в вакууме: уравнение теплового баланса

В стационарном приближении температура поверхности или узла кубсата определяется равенством приходящих и уходящих тепловых потоков:

$$Q_in = Q_out$$

Приход тепла Q_in складывается из четырёх основных составляющих:

1. Прямое солнечное излучение

$$Q_solar = S \cdot A_p \cdot \alpha \cdot cos\theta$$

где $S \approx 1367$ Вт/м² – солнечная постоянная (AM0), A_p – проекционная площадь, α – коэффициент поглощения (absorptivity) поверхности в солнечном спектре, θ – угол между нормалью к поверхности и направлением на Солнце.

2. Альбедо Земли (отражённое солнечное излучение)

$$Q_albedo = S \cdot a \cdot A_p \cdot \alpha \cdot F_Earth$$

где a – коэффициент альбедо Земли (в среднем 0,3, но сильно зависит от подстилающей поверхности и угла), F_Earth – фактор обзора Земли.

3. Собственное инфракрасное излучение Земли

$$Q_IR = E_Earth \cdot A_p \cdot \varepsilon \cdot F_Earth$$

где $E_Earth \approx 200–240 Вт/м^2$ – средний поток ИК-излучения Земли, ε – коэффициент излучения (emissivity) поверхности кубсата в ИК-диапазоне.

4. Внутреннее тепловыделение ($Q_{generated}$) – мощность, рассеиваемая электроникой, преобразователями, полезной нагрузкой и т.д.

Уход тепла происходит почти исключительно за счёт собственного теплового излучения в космическое пространство:

$$Q_out = A_r \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

где A_r – излучающая площадь, $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8} Вт/(м^2 \cdot К^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана, T – абсолютная температура поверхности.

Из равенства прихода и ухода получается оценка равновесной температуры:

$$T = \sqrt[4]{\frac{Q_{solar} + Q_{albedo} + Q_{IR} + Q_{generated}}{A_r \varepsilon \sigma}}$$

В реальности температура меняется динамически, и для точного моделирования используют нестационарные уравнения теплопроводности с учётом теплоёмкостей узлов, кондуктивных связей между ними и переменных факторов обзора. На LEO типичные значения внешних потоков: солнечный ~1367 Вт/м², альбедо до 400–450 Вт/м² (максимум), ИК Земли ~200–240 Вт/м².

Пассивная терморегуляция: оптические покрытия, ЭВТИ/MLI, радиаторы

Пассивные методы не потребляют энергию и поэтому образуют основу системы терморегулирования практически всех кубсатов. В условиях жёсткого энергобаланса любой активный нагреватель или термоэлектрический элемент отбирает драгоценные ватты у полезной нагрузки и радиолинии, тогда как оптические покрытия, многослойная изоляция,

правильно выбранные поверхности излучения и тепловые мосты работают постоянно и без затрат мощности. Именно пассивные средства задают средний тепловой режим аппарата и уменьшают амплитуду колебаний температуры, а активные элементы лишь подправляют его в наиболее критичных точках – обычно для поддержания температуры батареи или особо чувствительных приборов. Благодаря такому подходу удаётся удерживать тепловой режим в допустимых пределах при минимальном влиянии на энергетический бюджет миссии.

Оптические покрытия (α/ε).

Ключевым инструментом пассивного терморегулирования кубсата остаётся подбор оптических коэффициентов поверхности – коэффициента поглощения солнечного излучения α и коэффициента теплового излучения ε в инфракрасном диапазоне. Именно отношение α/ε определяет, насколько сильно грань нагревается на Солнце и насколько эффективно она сбрасывает тепло в космическое пространство, когда аппарат находится в тени или повёрнут излучающей стороной в холодный космос. При одном и том же геометрическом факторе обзора поверхность с низким α и высоким ε будет заметно холоднее, чем поверхность с высоким α и низким ε. Это позволяет ещё на этапе компоновки задавать предпочтительные тепловые потоки без затрат электроэнергии.

Типичные покрытия:

- белые терморегулирующие краски (AZ-93, S13G/LO и др.) – низкий α (~0,15–0,20), высокий ε (~0,85–0,90);
- чёрные покрытия – высокий α и ε (для внутренних поверхностей и радиаторов);
- зеркальные (VDA – vacuum deposited aluminum, серебро, золото) – очень низкий α и ε;
- специальные покрытия с настраиваемым α/ε (SiO_x на алюминизированном Kapton, ITO-покрытия и др.).

На практике используют несколько хорошо отработанных классов покрытий. Белые терморегулирующие краски типа AZ-93, S13G/LO и их аналоги дают низкий коэффициент поглощения (примерно 0,15–0,20) при высоком ε (0,85–0,90). Такие покрытия применяют на внешних поверхностях, которые часто освещаются Солнцем, но не должны сильно нагреваться. Чёрные покрытия, наоборот, обладают высоким α и высоким ε; их ставят на внутренние поверхности и на специально выделенные радиаторы, чтобы улучшить лучистый теплообмен внутри аппарата и эффективный сброс тепла наружу. Зеркальные покрытия – вакуумно напылённый алюминий (VDA), серебро, золото – характеризуются очень низкими значениями и α, и ε. Они отражают большую часть солнечного излучения и одновременно слабо излучают в инфракрасном диапазоне, поэтому их используют там, где нужно максимально изолировать элемент от внешнего теплового потока.

Существуют и более тонкие решения с настраиваемым отношением α/ε. Тонкие слои оксида кремния на алюминизированном Kapton, покрытия на основе оксида индия-олова (ITO) и некоторые многослойные оптические плёнки позволяют получать промежуточные значения коэффициентов и одновременно выполнять дополнительные функции – например, снимать электростатический заряд. Выбирая разные покрытия для разных граней, конструктор может сделать одну сторону аппарата относительно «холодной» и удобной для размещения

радиаторов, а другую – более «тёплой» и подходящей для батареи или чувствительной электроники, которой вреден сильный холод в тени.

Для кубсата важно не только начальное значение α/ε, но и его стабильность. Атомарный кислород, ультрафиолет, загрязнение продуктами дегазация и циклическое изменение температуры постепенно меняют оптические свойства поверхностей. Поэтому покрытия выбирают с подтверждённой стойкостью к условиям LEO, а в тепловой модели закладывают запас на возможную деградацию к концу миссии. Правильно назначенные и сохранившие свои характеристики оптические покрытия остаются одним из самых эффективных и «бесплатных» с точки зрения энергопотребления способов держать тепловой режим малого аппарата в заданных пределах.

Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ / MLI).

Многослойная изоляция (Multi-Layer Insulation, MLI) – один из самых эффективных пассивных способов резко уменьшить лучистый теплообмен в вакууме. Конструктивно это пакет из многих тонких плёнок с низким коэффициентом излучения, обычно алюминизированного Kapton или Mylar, разделённых сетчатыми или точечными спейсерами, чтобы соседние слои не касались друг друга. Каждый следующий слой отражает большую часть инфракрасного излучения предыдущего, и суммарный тепловой поток через пакет падает в десятки раз по сравнению с одной открытой поверхностью. На больших аппаратах MLI в виде полноценных «одеял» закрывает целые приборные отсеки и баки, задавая их тепловой режим.

На кубсатах применение классических многослойных одеял заметно ограничено. Свободного объёма почти нет, а любой свободно висящий край или незакреплённая петля создаёт риск зацепления при отделении от деплойера или при развёртывании солнечных панелей и антенн. Кроме того, толстый пакет MLI съедает драгоценные миллиметры внутри и без того тесного корпуса. Поэтому полные одеяла на аппаратах форм-фактора 1–3U встречаются редко и только там, где тепловая изоляция абсолютно критична и где удаётся надёжно зафиксировать края.

Вместо полноценных одеял на кубсатах широко используют «облегчённые» варианты той же идеи. Внутренние низкоэмиссионные экраны из одного-нескольких слоёв алюминизированной плёнки ставят между горячими и холодными зонами, чтобы уменьшить паразитный лучистый обмен. Отдельные приборы – особенно батареи, оптические датчики и прецизионные генераторы – оборачивают тонкими экранами или закрывают низкоэмиссионными лентами. Алюминизированный Kapton и специальные терморегулирующие ленты применяют для локальной изоляции жгутов, кронштейнов и участков каркаса, через которые тепло уходит слишком активно или, наоборот, приходит от солнечных панелей.

Важный практический момент – качество сборки. Даже лучшая многослойная изоляция теряет эффективность, если слои смяты, плотно прижаты друг к другу или имеют большие открытые края. На кубсате, где монтаж ведётся в очень ограниченном пространстве, это требует аккуратной технологии укладки, надёжной фиксации и проверки после вибрационных

испытаний. Кроме того, материалы MLI должны иметь подтверждённое низкое газовыделение, а наружные поверхности – сохранять свои оптические свойства под действием ультрафиолета и атомарного кислорода, если они выходят наружу.

В итоге на большинстве кубсатов MLI присутствует не в виде сплошного одеяла, а в виде набора локальных экранов, лент и тонких пакетов, которые точечно разрывают нежелательные лучистые связи. Такой подход позволяет существенно улучшить тепловой режим наиболее чувствительных узлов, не жертвуя объёмом и не создавая механических рисков при запуске и развёртывании. При правильном применении даже несколько хорошо установленных низкоэмиссионных слоёв дают заметный выигрыш и остаются одним из самых «дешёвых» по массе и энергии инструментов пассивного терморегулирования малого аппарата.

Радиаторы и чернота поверхностей.

Радиатором в вакууме становится любая поверхность с высоким коэффициентом излучения ε, которая «видит» холодное космическое пространство. Именно с неё тепло уходит в виде инфракрасного излучения, и никакой другой механизм сброса тепла у кубсата на орбите нет. Поэтому задача конструктора – обеспечить достаточную площадь таких поверхностей и доставить к ним тепло от внутренних источников с минимальными потерями.

На кубсатах полноценные отдельные радиационные панели применяют относительно редко: свободного места на внешних гранях почти всегда не хватает. Чаще всего радиатором служит сама конструкция – грани каркаса, не занятые солнечными элементами, или специально оставленные участки обшивки. Эти поверхности покрывают материалами с высоким ε (чёрные краски, определённые анодирования, специальные терморегулирующие покрытия), чтобы максимально эффективно излучать тепло. Одновременно стараются сделать коэффициент поглощения α по возможности низким, если грань может освещаться Солнцем; иначе радиатор сам станет мощным источником тепла в освещённой части орбиты. Когда удаётся выделить отдельную небольшую панель, её ориентируют так, чтобы она как можно дольше смотрела в открытый космос и как можно меньше – на Землю и Солнце.

Внутри аппарата действует обратный принцип. Внутренние поверхности каркаса, кронштейнов и модулей часто делают «чёрными» – с высоким ε. Это улучшает лучистый теплообмен между компонентами и помогает более равномерно распределять тепло, уменьшая локальные перегревы. В сочетании с тепловыми мостами такая внутренняя «чернота» позволяет использовать весь каркас как промежуточный тепловой коллектор, от которого тепло уже отводится к внешним излучающим граням.

Чтобы тепло реально дошло до радиатора, необходимы тепловые мосты. Медные и алюминиевые плетёные ленты, фольговые пакеты и современные графитовые гибкие теплоотводы соединяют корпусы процессоров, усилителей, преобразователей и аккумуляторных сборок с каркасом или напрямую с излучающей поверхностью. Без этих кондуктивных путей даже идеальный внешний радиатор останется холодным, а электроника – перегретой: собственного излучения с маленькой площади компонента катастрофически не хватает. На кубсатах мосты проектируют максимально короткими и лёгкими, с учётом вибраций, термоциклов и необходимости сохранять возможность сборки и разборки модулей.

В итоге система «тепловой мост – каркас – внешняя поверхность с оптимизированным α/ε» образует основной канал сброса тепла. Её эффективность напрямую определяет, смогут ли процессор, передатчик и батарея оставаться в допустимом температурном диапазоне на протяжении всей миссии. Поэтому выбор радиационных поверхностей, их покрытий и тепловых связей выполняют одновременно с компоновкой аппарата и проверяют в полной тепловой модели, а затем – в термовакуумных испытаниях.

Активная терморегуляция: нагреватели и фазопереходные материалы

Пассивных мер часто оказывается недостаточно, когда требуется удерживать температуру в узком диапазоне. Особенно это касается аккумуляторных батарей, которые быстро теряют ёмкость и ресурс при переохлаждении, и оптических датчиков – стар-трекеров, камер, детекторов, – чьи характеристики и термодеформации критично зависят от стабильности температуры. Пассивные покрытия и тепловые мосты задают средний тепловой режим и сглаживают самые грубые колебания, но не могут компенсировать длительный холод в тени или локальный перегрев при работе мощной нагрузки. В таких случаях в систему терморегулирования вводят активные элементы – прежде всего электрические нагреватели и, реже, устройства на основе фазопереходных материалов, – которые позволяют точечно подводить или буферизовать тепло и удерживать критичные компоненты в заданном температурном коридоре.

Нагревательные элементы.

Наиболее распространённым активным элементом терморегулирования на кубсатах стали тонкоплёночные нагреватели на полиимидной основе – так называемые Kapton heaters с резистивным фольговым контуром. Это тонкая плёнка полиимида с запечатанным внутри резистивным контуром из металлической фольги. Они:

- имеют малую массу и толщину;
- легко приклеиваются к поверхности;
- управляются термостатами, компараторами или программно бортовым компьютером (bang-bang или ПИД-регулирование).

При пропускании тока контур нагревается и передаёт тепло той поверхности, к которой приклеен нагреватель. Благодаря малой толщине и массе такие нагреватели почти не влияют на компоновку и могут быть установлены практически на любую плоскую или слегка изогнутую поверхность – на корпус батареи, на плату, на кронштейн оптического прибора или на участок каркаса.

Главное эксплуатационное достоинство Kapton-нагревателей – простота управления. Их можно включать и выключать простым ключом по сигналу термостата, компаратора или напрямую от бортового компьютера. Наиболее распространённый алгоритм – двухпозиционное регулирование (bang-bang): нагреватель включается при падении температуры ниже нижнего порога и выключается при достижении верхнего. В более требовательных случаях используют пропорционально-интегрально-дифференциальное

(ПИД) регулирование, которое позволяет удерживать температуру стабильнее и с меньшими колебаниями. На кубсатах оба подхода успешно применяются; выбор зависит от того, насколько узким должен быть температурный коридор и сколько вычислительных ресурсов можно выделить на контур управления.

Типичная мощность нагревателей, устанавливаемых на аккумуляторную сборку 3U-аппарата, составляет от одного до трёх ватт. Этого обычно достаточно, чтобы не дать батарее остыть ниже безопасного порога в тени. Для литий-ионных аккумуляторов нижнюю границу часто ставят в районе +5…+10 °C: при более низких температурах резко падает допустимый ток заряда и ускоряется деградация. Нагреватели батареи поэтому становятся одним из приоритетных потребителей в Safe Mode: даже когда вся остальная полезная нагрузка выключена, поддержание температуры аккумулятора остаётся обязательным.

Для оптических приборов – камер, стар-трекеров, некоторых типов детекторов – нагреватели решают другую задачу. Здесь важно не столько не допустить сильного холода, сколько обеспечить стабильность температуры. Даже небольшие термодеформации кронштейнов и объективов приводят к уходу оптической оси, расфокусировке или изменению калибровочных характеристик. Поэтому нагреватели на оптических платформах часто работают в режиме точного поддержания заданной температуры, а не просто защиты от минимума. Это требует более аккуратной настройки порогов или ПИД-коэффициентов и хорошей тепловой связи нагревателя с контролируемым узлом.

При проектировании приходится учитывать несколько практических ограничений. Нагреватель должен иметь надёжный тепловой контакт с поверхностью – обычно его приклеивают специальными термостойкими клеями с низким газовыделением. Сам полиимид и клей обязаны соответствовать требованиям по outgassing. Мощность и расположение выбирают так, чтобы не создавать локальных перегревов и не тратить лишнюю энергию, которой на кубсате всегда не хватает. Наконец, цепи питания нагревателей защищают от короткого замыкания и включают в общую логику энергосбережения: при критическом разряде батареи система должна уметь корректно ограничить или временно отключить даже эти жизненно важные потребители. При соблюдении этих условий тонкоплёночные нагреватели остаются простым, надёжным и хорошо отработанным средством активной подстройки теплового режима наиболее критичных элементов кубсата.

Фазопереходные материалы (PCM).

Фазопереходные материалы (PCM) поглощают или выделяют большое количество скрытой теплоты при фазовом переходе (обычно твёрдое тело ↔ жидкость) при почти постоянной температуре. Это позволяет «сглаживать» пики тепловыделения (например, при работе мощного передатчика или полезной нагрузки) и снижать амплитуду колебаний температуры.

Распространённые фазопереходные материалы:

- парафины (температура плавления 0–60 °C, теплота плавления 140–280 кДж/кг);
- соли и эвтектики;

- твердотельные PCM на основе оксида ванадия (VO_2, в том числе легированный вольфрамом) – перспективны, так как не имеют жидкой фазы и проблем с удержанием.

PCM размещают в металлических контейнерах или пористых структурах (в том числе 3D-печатных TPMS) вблизи защищаемого компонента. Недостаток – дополнительная масса и объём, а также необходимость хорошего теплового контакта (из-за низкой теплопроводности самих PCM).

В ряде миссий комбинируют PCM с нагревателями: PCM сглаживает быстрые колебания, а нагреватель компенсирует длительный холод в тени.

Интеграция и проектирование TCS

Проектирование системы терморегулирования кубсата начинается не после выбора приборов, а почти одновременно с компоновкой. Тепловые потоки зависят от того, где расположены солнечные панели, какие грани смотрят в космос, как близко друг к другу стоят горячие преобразователи и чувствительная оптика, какие материалы использованы для каркаса и креплений. Поэтому тепловой инженер работает в тесной связке с конструктором, специалистом по энергобалансу и разработчиком полезной нагрузки. Любое изменение компоновки – перенос батареи, добавление разворачиваемой панели, замена покрытия – сразу отражается на температурах и может потребовать пересмотра всей схемы пассивных и активных средств.

Основным инструментом анализа служат узловые тепловые математические модели. Аппарат разбивают на десятки, а для более детальных расчётов – на сотни узлов. Каждому узлу присваивают теплоёмкость, а между узлами задают кондуктивные связи (через каркас, тепловые мосты, крепёж) и радиационные связи (с учётом коэффициентов излучения, факторов обзора и внешних потоков от Солнца, Земли и альбедо). В модель включают внутренние тепловыделения приборов в разных режимах работы и логику включения нагревателей. Такие модели позволяют ещё до изготовления железа оценить, какие компоненты выйдут за допустимые пределы, где не хватает радиационной площади и насколько эффективны выбранные покрытия и мосты.

Модель сама по себе остаётся приближением. Её обязательно верифицируют термовакуумными испытаниями (TVAC). Аппарат или его тепловой макет помещают в камеру, где имитируют вакуум, холодный «космический» фон и солнечный поток. Прогоняют циклы, соответствующие освещённой и теневой частям орбиты, включают реальные режимы потребления и проверяют, насколько расчётные температуры совпадают с измеренными. Расхождения используют для уточнения контактных сопротивлений, эффективных площадей излучения и других параметров, которые трудно определить чисто расчётным путём. Без такой верификации риск неприятных сюрпризов на орбите резко возрастает.

Цель системы терморегулирования формулируется просто, но выполняется сложно: удержать все компоненты в допустимых температурных диапазонах – как операционных, так и неоперационных – на всех этапах миссии, и сделать это при минимальных затратах массы, объёма и энергии. На кубсате эти ресурсы ограничены особенно жёстко. Каждый лишний

грамм теплового моста или нагревателя, каждый лишний ватт, потраченный на подогрев батареи в тени, напрямую уменьшает возможности полезной нагрузки. Поэтому предпочитают максимально использовать пассивные средства и включать активные элементы только там, где без них действительно нельзя обойтись.

Успешная терморегуляция напрямую влияет на ключевые характеристики миссии. Ресурс аккумуляторов сильно зависит от того, в каком температурном диапазоне они работают и как часто подвергаются глубоким холодам. Стабильность оптики и точность наведения стар-трекеров и камер определяются термодеформациями и дрейфом температур. Надёжность электроники снижается при систематических выходах за рекомендованные пределы. В конечном счёте именно качество теплового проектирования часто решает, сможет ли кубсат отработать запланированный срок и выполнить свою задачу, или же откажется раньше из-за перегрева процессора, переохлаждения батареи или ухода калибровок оптических приборов. Поэтому TCS на современном кубсате – не вспомогательная подсистема, а один из центральных элементов, связывающих конструкцию, энергетику и работоспособность всей миссии.

6. Нервная система и вычисления (On-Board Data Handling – OBDH / OBC)

Бортовой компьютер и система обработки данных (On-Board Computer / On-Board Data Handling, OBC/OBDH) выполняют роль «нервной системы» и «головного мозга» кубсата. Они обеспечивают сбор телеметрии, исполнение команд, управление подсистемами, выполнение алгоритмов ориентации, обработку данных полезной нагрузки, реализацию логики автономии и восстановление после сбоев. В условиях жёстких ограничений по мощности, объёму, массе и радиационной стойкости архитектура OBC прошла значительную эволюцию – от простых 8-битных микроконтроллеров до мощных гетерогенных систем на кристалле с FPGA и многоядерными процессорами.

Вычислительные ядра: от 8/16-битных микроконтроллеров к ARM, RISC-V и FPGA

На заре кубсатов доминировали 8- и 16-битные микроконтроллеры (PIC, AVR, MSP430). Они потребляли милливатты, были просты в программировании «на железе» и достаточны для базовых задач. С ростом сложности миссий потребовался переход на 32-битные архитектуры:

- ARM Cortex-M (M3, M4, M7) – наиболее распространённое решение. Cortex-M7 обеспечивает сотни DMIPS при потреблении сотен милливатт, имеет аппаратный FPU и отличную экосистему. Радиационно-толерантные варианты позволяют использовать COTS-подход.
- ARM Cortex-R – ориентированы на системы реального времени и повышенную отказоустойчивость.
- ARM Cortex-A – применяются в более мощных OBC, способных запускать Linux. Часто входят в состав гетерогенных SoC (Zynq, Zynq UltraScale+).
- RISC-V – открытая архитектура, набирающая популярность как в виде soft-процессоров в FPGA, так и в виде готовых реализаций.

- FPGA и гибридные SoC (Xilinx/AMD Zynq, Microchip PolarFire SoC, SmartFusion2 и др.). Обеспечивают аппаратное ускорение, TMR, обнаружение и исправление одиночных сбоев (scrubbing) конфигурации и пользовательские интерфейсы.

Современная тенденция в бортовых компьютерах кубсатов – это переход к гетерогенным архитектурам, в которых на одном кристалле или в одном модуле сочетаются обычные процессорные ядра и программируемая логика ПЛИС (FPGA). Процессорные ядра удобны для выполнения сложного программного обеспечения, работы с операционными системами и алгоритмов общего назначения. Внутренняя структура ПЛИС (FPGA-ткань), напротив, позволяет реализовать критичные по времени и надёжности функции непосредственно «в железе»: тройное модульное резервирование, быструю обработку сигналов датчиков, защиту памяти и специализированные интерфейсы.

Благодаря такому разделению задачи разной критичности выполняются на наиболее подходящих ресурсах: жизненно важные функции – на защищённой и предсказуемой логике FPGA, а менее критичные и вычислительно тяжёлые – на мощных процессорных ядрах. В результате удаётся повысить и производительность, и отказоустойчивость системы без чрезмерного роста массы, объёма и энергопотребления.

Операционные среды: RTOS и встраиваемый Linux

Системы реального времени (RTOS):

- FreeRTOS – де-факто стандарт для кубсатов, обладающих весьма ограниченными вычислительными ресурсами.
- Zephyr – современная RTOS с развитой моделью устройств и поддержкой CSP.
- RT-Thread, RTEMS и другие.

Встраиваемый Linux применяется на более мощных бортовых вычислительных системах (OBC) и даёт полноценный сетевой стек и возможность сложных приложений. Часто используется гибридный подход: критичные задачи под RTOS, обработка данных – под Linux.

Информационные магистрали: шины и протоколы

Низкоуровневые шины: I²C, SPI, UART – для датчиков и простой периферии; CAN – популярный выбор для соединений между платами благодаря помехоустойчивости; SpaceWire – для высокоскоростных линий.

CubeSat Space Protocol (CSP) – лёгкий с точки зрения необходимых вычислительных ресурсов стек, реализующий модель, близкую к TCP/IP, с минимальным заголовком. Поддерживает адресацию, маршрутизацию, QoS и работает поверх CAN, I²C, UART и других интерфейсов. Библиотека libcsp портирована на FreeRTOS, Zephyr и Linux.

Автономия и самосохранение: режимы работы, FDIR и watchdog

Режимы работы: Safe Mode (минимальная конфигурация для сохранения аппарата), Operational/Nominal Mode, промежуточные режимы.

FDIR (Fault Detection, Isolation, and Recovery) – иерархический комплекс обнаружения аномалий, изоляции неисправных модулей и восстановления (перезапуск, переключение на резерв, переход в Safe Mode).

Аппаратные watchdog-таймеры – внешние и внутренние, обеспечивающие принудительный сброс при зависании. Часто применяются несколько уровней (процессорный + внешний на EPS).

Дополнительно используются scrubbing памяти и конфигурации FPGA, TMR критичных функций, ECC-память и разнородное резервирование.

7. Моторика и пространственные рефлексы (ADCS & Propulsion)

Система определения и управления ориентацией (Attitude Determination and Control System, ADCS) вместе с двигательной установкой образует «моторику» и «пространственные рефлексы» кубсата. Она отвечает за гашение начальной закрутки после отделения, стабилизацию, прецизионное наведение на Землю, Солнце или произвольную цель, а также за орбитальные манёвры и компенсацию аэродинамического торможения.

Органы чувств (Сенсоры ориентации)

Для того чтобы кубсат мог управлять своей ориентацией в пространстве, ему необходима информация о том, как он повёрнут относительно внешних опорных направлений – магнитного поля Земли, Солнца, звёзд или горизонта планеты. Эту информацию дают датчики ориентации. В отличие от крупных аппаратов, где часто устанавливают несколько высокоточных и дорогостоящих приборов, на кубсатах приходится искать компромисс между точностью, массой, энергопотреблением, стоимостью и надёжностью. В результате формируется типичный «набор органов чувств», который может быть довольно скромным для простых миссий и достаточно развитым для задач, требующих точного наведения:

- Магнитометры – измеряют вектор геомагнитного поля. Дешёвые, лёгкие, работают на всей орбите, включая тень. Требуют калибровки и защиты от собственных магнитных полей аппарата.
- Солнечные датчики – грубые (фотодиоды, 2–5°) и точные (fine sun sensors, доли градуса). Бесполезны в тени.
- MEMS-гироскопы – измеряют угловую скорость. Необходимы для распространения ориентации и работы в тени, но страдают от дрейфа смещения.
- Астродатчики (Star Trackers) – наиболее точный абсолютный датчик (угловые секунды – десятки угловых секунд). Требуют бленд и относительно высокое энергопотребление.
- Датчики горизонта (Earth Horizon Sensors) – ИК-датчики края диска Земли, полезны для надир-ориентации и работы в тени.

Базовая комбинация: магнитометр + солнечный датчик + гироскоп. Добавление стар-трекера и/или датчика горизонта переводит систему в класс высокоточных.

Магнитометр измеряет вектор индукции геомагнитного поля в связанной системе координат аппарата. Это один из самых распространённых и доступных датчиков ориентации. Современные трёхосные магнитометры на эффекте Холла или магниторезистивные датчики имеют массу от нескольких граммов до нескольких десятков граммов, потребляют десятки милливатт и выдают измерения с разрешением порядка единиц–десятков нанотесла. Их главное достоинство – работоспособность на всей орбите, включая тень, где солнечные датчики бесполезны.

Магнитометр даёт один опорный вектор, поэтому сам по себе определяет ориентацию только с точностью до вращения вокруг направления поля. На практике его почти всегда комбинируют с другим векторным датчиком. Серьёзным ограничением является чувствительность к собственным магнитным полям кубсата – токам в солнечных панелях, кабелях, реакционных колёсах и ферромагнитным деталям конструкции. Поэтому магнитометр либо тщательно калибруют с учётом этих помех, либо выносят на короткую штангу, либо используют алгоритмы компенсации. Несмотря на относительно невысокую точность (обычно единицы градусов), магнитометр остаётся незаменимым элементом системы определения ориентации практически всех кубсатов, особенно на этапе гашения начальной закрутки.

Солнечные датчики определяют направление на Солнце. По точности и сложности их принято делить на грубые и точные. Грубые солнечные датчики часто представляют собой набор фотодиодов, размещённых на разных гранях аппарата, либо вовсе используют ток солнечных панелей как косвенный признак освещённости. Точность таких измерений обычно составляет 2–5 градусов, зато они почти ничего не весят и не требуют дополнительной энергии. Точные солнечные датчики (fine sun sensors) строятся на основе щелевых масок, матричных приёмников или специальных оптических схем и способны определять направление на Солнце с погрешностью в доли градуса. Они дают второй независимый вектор, который в сочетании с магнитометром позволяет полностью определить трёхосную ориентацию на освещённой части орбиты.

Главный недостаток всех солнечных датчиков очевиден: в тени Земли они перестают работать. Кроме того, на точность влияют альбедо Земли и Луны, а также возможные засветки от элементов конструкции самого аппарата. Тем не менее даже простые фотодиодные датчики остаются обязательным элементом большинства систем ориентации кубсатов, потому что обеспечивают быстрое и надёжное определение направления на Солнце в номинальном режиме.

Мемс-гироскопы измеряют не абсолютную ориентацию, а угловую скорость вращения аппарата вокруг связанных осей. Современные микромеханические гироскопы имеют массу в единицы граммов и потребление в милливатты, что делает их идеальными для кубсатов. Они необходимы для двух задач. Во-первых, в короткие промежутки времени, когда абсолютные датчики недоступны или дают сбои, гироскопы позволяют «распространять» ориентацию методом интегрирования угловой скорости (dead reckoning). Во-вторых, именно гироскопические измерения используются в фильтрах Калмана для сглаживания данных и оценки текущего состояния. Главный недостаток МЕМС-гироскопов – дрейф смещения (bias

drift). Даже небольшая постоянная ошибка в измерении угловой скорости при интегрировании быстро превращается в растущую ошибку угла. Поэтому гироскопы почти никогда не используются самостоятельно в течение длительного времени: их показания постоянно корректируются по данным магнитометров, солнечных датчиков или астродатчиков. В хороших образцах, предназначенных для космических применений, дрейф удаётся удерживать на уровне долей градуса в час, однако потребительские MEMC-чипы могут «уплывать» на градусы за минуты. Выбор гироскопов и их калибровка – одна из важных инженерных задач при проектировании ADCS.

Астродатчик (star tracker) – наиболее точный абсолютный датчик ориентации, доступный для малых аппаратов. Он представляет собой компактную камеру, которая снимает участок звёздного неба и сравнивает изображение с бортовым каталогом звёзд. В результате выдаётся кватернион ориентации с точностью от нескольких угловых секунд до нескольких десятков угловых секунд. Современные миниатюрные стар-трекеры уже умещаются в объём, совместимый с 3U- и тем более 6U-кубсатами, имеют массу порядка сотен граммов и потребляют единицы ватт. Они способны работать как в режиме «потерян в космосе» (lost-in-space), когда ориентация неизвестна заранее, так и в режиме сопровождения, когда прибор отслеживает уже опознанные звёзды.

Основные ограничения связаны с засветкой. Солнце, Земля и Луна не должны попадать в поле зрения, поэтому стар-трекеры снабжают блендами и часто имеют ограничения по углу между оптической осью и яркими объектами. Кроме того, прибор относительно энергоёмок и требует вычислительных ресурсов для обработки изображений. Несмотря на эти ограничения, появление доступных коммерческих стар-трекеров кардинально изменило возможности кубсатов: задачи, ранее доступные только аппаратам массой в сотни килограммов, стали выполнимы на платформах в несколько килограммов.

Датчики горизонта (Earth horizon sensors) определяют направление на край видимого диска Земли, используя его инфракрасное излучение. Поскольку Земля в инфракрасном диапазоне имеет сравнительно стабильную «кромку», такие датчики позволяют измерять углы тангажа и крена с точностью порядка 0,2–1 градуса. Они особенно полезны для миссий, требующих постоянной надирной ориентации, и сохраняют работоспособность в тени, где солнечные датчики не действуют. Современные миниатюрные ИК-датчики горизонта имеют массу в десятки граммов и умеренное энергопотребление. Их часто устанавливают попарно или в составе более сложных оптических головок. Ограничения связаны с зависимостью от высоты орбиты, сезонными изменениями излучения Земли и возможным влиянием облачности в отдельных спектральных диапазонах. Тем не менее для многих прикладных задач датчик горизонта оказывается очень удачным компромиссом между точностью, простотой и возможностью работы на всей орбите.

На практике почти ни один кубсат не полагается на один-единственный тип датчика. Базовая и наиболее распространённая комбинация – магнитометр плюс солнечный датчик плюс MEMC-гироскоп. Она обеспечивает полное определение ориентации на освещённой части орбиты и позволяет поддерживать приемлемую оценку состояния в тени за счёт интегрирования гироскопов с коррекцией по магнитному полю. Такая схема дёшева, легка,

энергоэффективна и имеет большой полётный опыт. Когда миссия требует более высокой точности наведения – например, для съёмки Земли с разрешением в несколько метров, лазерной связи или научных измерений, – в систему добавляют стар-трекер и/или датчик горизонта. Появление этих приборов переводит ADCS в класс высокоточных систем и одновременно повышает требования к вычислительной платформе, калибровке, защите от засветок и энергобалансу. Таким образом, набор «органов чувств» кубсата всегда проектируется исходя из конкретных требований миссии: от простейшей комбинации для стабилизации и грубого наведения до полноценного высокоточного комплекса, способного конкурировать с системами гораздо более крупных аппаратов.

Исполнительные органы (Актюаторы)

Если датчики дают кубсату информацию о том, как он ориентирован в пространстве, то актюаторы позволяют эту ориентацию изменять. Именно исполнительные органы создают управляющие моменты, которые разворачивают аппарат в нужном направлении, гасят остаточную закрутку после отделения от деплойера и поддерживают заданное положение в течение всей миссии. На кубсатах набор актюаторов жёстко ограничен массой, объёмом и энергопотреблением, поэтому конструкторы опираются на небольшое число хорошо отработанных решений, комбинируя их в зависимости от требований к точности и динамике.

Магнитные токовые катушки (magnetorquers), остаются самым распространённым и надёжным средством создания внешнего управляющего момента. Принцип их действия прост: по катушке или по обмотке на ферромагнитном сердечнике пропускается ток, возникает магнитный момент $\boldsymbol{m}$, который взаимодействует с геомагнитным полем $\boldsymbol{B}$ и создаёт механический момент $\boldsymbol{m} \times \boldsymbol{B}$. Поскольку рабочее тело здесь – само магнитное поле Земли, расходников нет, ресурс практически неограничен, а конструкция чрезвычайно проста и устойчива к радиации и частому изменению температурных циклов. Катушки могут быть воздушными (без сердечника) или стержневыми (с пермаллоевым или ферритовым сердечником); последние дают больший момент при том же токе, но вносят дополнительные магнитные помехи и требуют более осторожного размещения относительно магнитометров.

Главное физическое ограничение магнитных токовых катушек состоит в том, что создаваемый момент всегда перпендикулярен вектору $\boldsymbol{B}$. Вдоль направления магнитного поля управлять ориентацией невозможно. Кроме того, величина момента невелика – обычно единицы–десятки миллиньютон-метров для типичных кубсатовских катушек. Поэтому магнитные актюаторы хорошо подходят для относительно медленных операций: гашения начальной угловой скорости после отделения (detumbling), грубой ориентации, поддержания стабилизации в режимах с невысокими требованиями к точности и, что особенно важно, для разгрузки реакционных колёс. Алгоритм B-dot, использующий именно магнитными токовыми катушками, стал классическим способом быстро и надёжно остановить хаотическое вращение только что выведенного аппарата. Благодаря простоте, низкой стоимости и отсутствию

расходников магнитные катушки входят почти в каждую систему ориентации кубсата, даже если основная точная работа выполняется маховиками.

Двигатели-маховики, или реакционные колёса (reaction wheels), обеспечивают принципиально другой уровень управления. Маховик представляет собой электрический двигатель с инерционным ротором. Когда ротор ускоряется или замедляется, по закону сохранения момента количества движения на корпус аппарата действует равный по величине и противоположный по направлению реактивный момент. Три (или четыре) маховика, установленные по ортогональным или близким к ортогональным осям, позволяют создавать управляющий момент вокруг любой оси и тем самым осуществлять полноценное трёхосное управление. Современные кубсатные маховики имеют массу от десятков до нескольких сотен граммов, способны развивать моменты порядка единиц–десятков миллиньютон-метров и накапливать кинетический момент в пределах десятков миллиньютон-метров-секунд. Именно они обеспечивают ту точность наведения, которая нужна для съёмки Земли, наведения антенн или научных инструментов.

Однако у реакционных колёс есть принципиальное ограничение. Внешние возмущающие моменты – аэродинамические, гравитационно-градиентные, магнитные, связанные с давлением солнечного света – постепенно «накачивают» маховики. Скорость вращения роторов растёт, и в какой-то момент колесо достигает предела по оборотам (насыщение). После этого оно больше не может создавать момент в нужном направлении. Чтобы вернуть возможность управления, накопленный кинетический момент необходимо сбросить вовне. Эту операцию называют разгрузкой, или momentum dumping. На кубсатах её почти всегда выполняют магнитные катушки: создавая внешний момент $\boldsymbol{m} \times \boldsymbol{B}$, они позволяют уменьшить скорость маховиков, не расходуя топливо. В редких случаях, когда на аппарате есть двигательная установка, разгрузку можно провести и микроимпульсами тяги. Без периодической разгрузки система на реакционных колёсах неизбежно теряет управляемость, поэтому связка «маховики + магнитные катушки» стала стандартной архитектурой точного ADCS для кубсатов.

Управляющие гиродины (control moment gyros, CMG) представляют собой ещё один класс моментных актюаторов. В них ротор вращается с постоянной высокой скоростью, а управляющий момент создаётся за счёт поворота оси ротора с помощью карданных подвесов. Благодаря гироскопическому эффекту CMG способны выдавать очень большие моменты при относительно небольшой затрате энергии на приводы подвесов. На больших космических аппаратах гиродины давно применяются для быстрого перенацеливания. На кубсатах, однако, они встречаются редко. Причины – сложность механики, необходимость точных подшипников и приводов, заметный объём и масса, а также более высокие требования к управлению и надёжности. Для большинства миссий 3U–12U выигрыш в моменте не окупает усложнения системы, поэтому конструкторы предпочитают комбинацию реакционных колёс и магнитных катушек. Тем не менее по мере появления всё более компактных гиродинов и

роста размеров кубсатовских платформ этот класс актюаторов может постепенно найти свою нишу в задачах, требующих очень быстрых разворотов.

Типичная конфигурация системы ориентации современного кубсата, претендующего на точное наведение, выглядит следующим образом: три или четыре реакционных колеса (четвёртое часто добавляют для резервирования и улучшения распределения момента) и три магнитных катушки, ориентированные по основным осям аппарата. Катушки используются для detumbling сразу после отделения, для грубой ориентации в аварийных режимах и для регулярной разгрузки маховиков. Маховики обеспечивают основное точное управление в номинальном режиме. Такая схема сочетает высокую точность и динамику реакционных колёс с практически неограниченным ресурсом и простотой магнитных актюаторов. Именно она стала «рабочей лошадкой» большинства успешных прикладных и научных кубсатовских миссий последнего десятилетия.

Выбор конкретных характеристик актюаторов всегда определяется требованиями миссии. Если достаточно стабилизации с точностью в несколько градусов и медленных разворотов, можно обойтись одними магнитными токовыми катушками. Если нужна съёмка с разрешением метры или наведение узконаправленной антенны, без реакционных колёс не обойтись. При этом конструктор обязан учитывать не только номинальные моменты и запас кинетического момента, но и вибрации, создаваемые маховиками, их влияние на магнитометры, тепловыделение, ресурс подшипников в вакууме и возможность работы после отдельных отказов. Всё это превращает проектирование набора исполнительных органов из простой задачи «поставить три колеса» в полноценный системный анализ, от качества которого напрямую зависит, сможет ли кубсат выполнять свою основную работу на орбите.

Алгоритмы ориентации

Актюаторы и датчики сами по себе ещё не создают управляемой ориентации. Между измерениями и командами на катушки или маховики лежит слой алгоритмов, который превращает сырые данные в оценку текущего состояния аппарата и вырабатывает управляющие воздействия. На кубсатах этот слой должен быть одновременно достаточно точным, устойчивым к сбоям и вычислительно «лёгким», потому что ресурсы бортового процессора и памяти ограничены. В результате сформировался относительно стандартный набор алгоритмов, закрывающий три основные задачи: быстрое гашение начальной закрутки, определение ориентации и прецизионное наведение.

Гашение начальной угловой скорости после отделения от деплойера – первая и часто критическая операция. Кубсат выходит из контейнера с произвольной и довольно высокой скоростью вращения, иногда в несколько десятков градусов в секунду. В таком состоянии солнечные панели плохо освещены, связь неустойчива, а точные датчики и маховики ещё не могут нормально работать. Классическим и до сих пор наиболее распространённым решением является алгоритм B-dot. Он использует только измерения магнитометра. Идея проста: если магнитный момент катушек направлять против изменения вектора магнитного поля,

наблюдаемого в связанной системе координат, то энергия вращения аппарата будет постепенно рассеиваться.

Математически закон обычно записывают в виде: $\mathbf{m} = -k \cdot \dot{\mathbf{B}}/|\mathbf{B}|^2$ где k – коэффициент усиления. Алгоритм не требует знания текущей ориентации, не нуждается в модели движения и чрезвычайно робастен. Именно поэтому B-dot применяют практически на всех кубсатах на этапе приведении спутника из хаотичного вращения (которое почти всегда возникает при отделении от ракеты-носителя) в состояние с минимальной угловой скоростью (detumbling).

После отделения кубсата от разгонного блока или пускового контейнера аппарат обычно вращается с довольно высокой скоростью – иногда это десятки градусов в секунду. Для работы большинства систем (ориентации, связи, съёмки) такое вращение недопустимо: антенны не наведёшь, камеру не используешь, солнечные панели не выставишь. Поэтому первым делом нужно «успокоить» спутник.

Недостатками алгоритма B-dot являются относительно медленная сходимость при слабом магнитном поле (на высоких широтах или больших высотах) и принципиальная невозможность полностью остановить вращение вокруг направления **B**. Тем не менее для перевода аппарата из хаотического вращения в состояние, пригодное для включения более точных режимов, B-dot остаётся незаменимым инструментом.

После того как угловая скорость снижена, необходимо определить, как именно кубсат ориентирован в пространстве. Для этого используются измерения векторных датчиков – магнитометра, солнечного датчика, стар-трекера, датчика горизонта. Если в распоряжении есть два неколлинеарных опорных вектора (например, направление на Солнце и вектор магнитного поля), ориентацию можно найти геометрически. Классические методы – TRIAD и QUEST. TRIAD строит ортонормированные базисы по двум векторам в инерциальной и связанной системах координат и напрямую вычисляет матрицу поворота. QUEST (QUaternion ESTimator) решает ту же задачу в кватернионах, минимизируя взвешенную ошибку согласования нескольких векторов, и считается более точным и численно устойчивым. Оба метода дают «мгновенный снимок» ориентации, но не используют информацию о движении аппарата и не оценивают дрейф гироскопов.

Для непрерывной и более точной оценки состояния применяют фильтры Калмана. На кубсатах почти стандартом стал мультипликативный расширенный фильтр Калмана – MEKF (Multiplicative Extended Kalman Filter). В отличие от обычного расширенного фильтра, MEKF работает с ошибкой ориентации в касательном пространстве, а саму ориентацию представляет кватернионом. Это позволяет корректно учитывать, что ориентация – элемент группы вращений, а не обычный трёхмерный вектор. Фильтр одновременно оценивает ориентацию и смещения (bias) гироскопов, используя измерения абсолютных датчиков для коррекции. Благодаря этому удаётся компенсировать дрейф МЕМС-гироскопов и получать гладкую оценку ориентации даже в те периоды, когда абсолютные датчики временно недоступны

(например, в тени или при засветке стар-трекера). MEKF требует аккуратной настройки шумов процесса и измерений, а также учёта возможных сбоев датчиков, но при правильной реализации обеспечивает точность, достаточную для большинства прикладных задач кубсатов.

Когда оценка ориентации получена, остаётся выработать команды актюаторам, чтобы привести аппарат к заданному положению и удерживать его. Это задача управления, или прецизионного наведения. Набор типовых режимов хорошо известен: надирная ориентация (одна ось смотрит в центр Земли), солнечная ориентация (максимальное освещение панелей или наведение солнечных датчиков), инерциальная ориентация (фиксированное направление в пространстве) и слежение за наземной целью (tracking). Для каждого режима формируется ошибка ориентации – обычно в виде малого угла поворота или кватерниона ошибки – и ошибки угловой скорости.

Простейшие и до сих пор очень распространённые законы управления – пропорционально-дифференциальный (PD) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (PID). Момент, подаваемый на маховики, формируется как сумма члена, пропорционального ошибке угла, и члена, пропорционального ошибке угловой скорости; интегральная составляющая устраняет постоянные возмущения. Такие регуляторы просты в реализации, понятны инженеру и при правильной настройке коэффициентов обеспечивают приемлемую точность для многих миссий. Более совершенные подходы опираются на методы оптимального управления, в частности на линейно-квадратичный регулятор (LQR). В LQR минимизируется квадратичный критерий, штрафующий одновременно ошибку состояния и затраты управляющего момента. Это позволяет явно учитывать ограничения по ресурсу маховиков и получать более «экономичное» управление. Встречаются и нелинейные законы, построенные непосредственно на кватернионах или матрицах поворота, а также адаптивные и робастные регуляторы, способные работать при неопределённостях модели и деградации актюаторов.

Важным практическим аспектом является согласованная работа контура управления с разгрузкой маховиков. Пока маховики не насыщены, основной момент создаётся ими. Когда кинетический момент приближается к пределу, алгоритм разгрузки с помощью магнитных катушек начинает уменьшать накопленный момент, стараясь минимально возмущать ориентацию. Хорошо спроектированный ADCS умеет совмещать точное наведение и разгрузку так, чтобы полезные операции (съёмка, сеанс связи) не прерывались.

В целом алгоритмическое обеспечение ориентации кубсата представляет собой иерархию. На нижнем уровне – быстрый и грубый B-dot, переводящий аппарат из хаотического вращения в управляемое состояние. На среднем – определение ориентации геометрическими методами или, чаще, фильтром MEKF, который непрерывно оценивает состояние и параметры гироскопов. На верхнем – законы управления, превращающие ошибку ориентации в команды маховикам и катушкам. От качества реализации каждого из этих уровней зависит, сможет ли

кубсат не просто «лежать» на орбите, а целенаправленно смотреть на Землю, Солнце или заданную точку пространства и выполнять свою миссию.

Двигательные установки (Propulsion)

Долгое время большинство кубсатов обходились без собственной двигательной установки. Для простых технологических и образовательных миссий достаточно было пассивного схода с орбиты за счёт аэродинамического торможения. Однако по мере усложнения задач – поддержания орбиты, фазирования группировок, уклонения от столкновений, перехода между орбитами и активного увода в конце миссии – потребность в собственном Δv стала очевидной. Сегодня двигательная установка перестала быть экзотикой и превратилась в один из ключевых элементов «моторики» продвинутых кубсатов. При этом ограничения по массе, объёму, мощности и безопасности остаются чрезвычайно жёсткими, поэтому выбор типа двигателя всегда представляет собой компромисс.

Простейший и наиболее отработанный класс – двигатели на холодном газе. В них рабочее тело (обычно азот, бутан, тетрафторметан или другой газ/сжиженный газ) хранится под давлением и выбрасывается через сопло без химической реакции или электрического нагрева. Удельный импульс таких систем невелик – обычно 40–80 секунд, – зато конструкция предельно проста: бак, клапаны, редуктор и сопло. Нет высоких температур, нет сложных источников питания, нет риска электрических пробоев. Холодный газ хорошо подходит для задач ориентации (вместо или в дополнение к маховикам), небольших орбитальных коррекций и точной подстройки положения. Благодаря надёжности и предсказуемости холодный газ часто выбирают, когда требуется гарантированная работоспособность при минимальной сложности. Главные недостатки – низкая эффективность по массе рабочего тела и относительно большой объём, необходимый для хранения газа под давлением. Для миссий, где требуется заметный суммарный Δv, холодный газ быстро становится слишком тяжёлым решением.

Существенно более высокую эффективность дают электростатические и электроспрейные двигатели, в частности системы типа electrospray и FEEP (Field Emission Electric Propulsion). В них жидкий металл или ионная жидкость подаётся к эмиттеру, где под действием сильного электрического поля образуются и ускоряются ионы или заряженные капли. Удельный импульс таких двигателей лежит в диапазоне примерно от 1000 до 6000 секунд, а тяга измеряется микроньютонами. Благодаря очень высокому Isp для получения заметного Δv требуется лишь граммы рабочего тела. Электроспрейные двигатели хорошо миниатюризируются: существуют модули, умещающиеся в доли юнита и потребляющие единицы ватт. Они идеально подходят для точной компенсации аэродинамического торможения на низких орбитах, поддержания относительного положения в группировке и небольших орбитальных манёвров. Ограничения связаны с малой абсолютной тягой (манёвры занимают много времени), необходимостью высокого напряжения и требованиями к чистоте и стабильности подачи рабочего тела. Тем не менее именно этот класс двигателей считается одним из наиболее перспективных для кубсатов, которым нужен большой суммарный Δv при жёстком ограничении массы.

Импульсные плазменные двигатели (Pulsed Plasma Thrusters, PPT) занимают промежуточное положение. В классическом варианте рабочим телом служит твёрдый фторопласт (тефлон): электрический разряд испаряет и ионизирует материал, после чего плазма ускоряется электромагнитными силами. Существуют и варианты с жидким рабочим телом. PPT выдают тягу импульсами, удельный импульс составляет от нескольких сотен до примерно тысячи секунд, а средняя тяга – единицы–десятки микроньютонов. Достоинства – относительно простая схема хранения рабочего тела (нет высокого давления), возможность длительного хранения и хороший опыт применения на малых аппаратах. Недостатки – эрозия электродов, электромагнитные помехи от мощных разрядов, импульсный характер тяги и умеренный КПД. PPT часто рассматривают как компромиссный вариант, когда нужен больший Δv, чем способен дать холодный газ, но ещё нет возможности установить более сложную электроракетную систему.

Двигатели Холла (Hall-effect thrusters) представляют уже «взрослый» класс электроракетных двигателей, успешно применяемый на аппаратах от десятков до тысяч килограммов. В них рабочее тело (обычно ксенон или, всё чаще, более доступный криптон и даже йод) ионизируется в разряде, а ионы ускоряются электрическим полем в присутствии магнитного поля, создающего эффект Холла. Удельный импульс типичных малых холловских двигателей составляет 1000–2000 секунд, тяга – от долей до нескольких миллиньютонов. Для работы требуются десятки ватт электрической мощности, система хранения и подачи газа, а также нейтрализатор. На кубсатах холловские двигатели применяются преимущественно на платформах 6U и крупнее, где уже можно выделить достаточный объём, мощность и массу. Они позволяют выполнять заметные орбитальные манёвры, подъём или снижение орбиты, фазирование и активный увод в конце миссии за разумное время. Основные сложности – потребность в значительной электрической мощности, тепловыделение, необходимость квалифицированной работы с ксеноном или альтернативными рабочими телами и более высокие требования к электромагнитной совместимости.

Выбор конкретной двигательной установки всегда определяется сочетанием нескольких факторов. Первый – требуемый суммарный характеристический скорость (Δv). Если нужны лишь небольшие коррекции и ориентация, достаточно холодного газа. Если миссия требует поддержания орбиты в течение лет или перехода между орбитами, предпочтительнее электроспрей, PPT или холловский двигатель. Второй фактор – доступная электрическая мощность: электроракетные системы напрямую зависят от энергобаланса аппарата. Третий – объём и масса, которые можно выделить под двигательную установку, баки и электронику. Четвёртый – требования безопасности и сертификации: системы с высоким давлением, токсичными или легкоиспаряющимися компонентами, а также с высоким напряжением проходят более жёсткую проверку. Наконец, учитываются надёжность, опыт предыдущих полётов и возможность интеграции с системой ориентации (многие манёвры требуют одновременной работы ADCS).

В результате на современных кубсатах можно встретить весь спектр решений – от простых холодных газовых систем до компактных электроспрейных и холловских двигателей. Двигательная установка перестала быть необязательным дополнением и превратилась в инструмент, который позволяет кубсату не только «существовать» на орбите, но и активно управлять своим положением, продлевать срок службы и ответственно завершать миссию. Именно появление доступных и достаточно эффективных малых двигателей стало одним из ключевых факторов превращения кубсатов из короткоживущих демонстраторов в полноценные элементы космической инфраструктуры.

8. Физиология связи и внешней коммуникации (Communications – COMMS)

Система связи (Communications, COMMS) – это «органы чувств и голос» кубсата, обеспечивающие обмен информацией с наземными станциями и, в ряде миссий, с другими космическими аппаратами. В условиях жёстких ограничений по мощности передатчика (обычно единицы ватт), размеру антенн и времени радиовидимости (5–15 минут на пролёт) проектирование радиолинии требует тщательного баланса между скоростью передачи данных, надёжностью и энергопотреблением. Современные кубсаты используют диапазон от метровых волн (VHF/UHF) до миллиметровых (Ka-band), переходя от простых телеметрических линий к высокоскоростным каналам сброса данных полезной нагрузки.

Радиочастотные тракты: диапазоны и их назначение

Радиолиния – это единственный канал, через который кубсат получает команды с Земли и отдаёт результаты своей работы. Выбор частотного диапазона определяет, сколько данных можно передать за один сеанс, насколько сложной должна быть антенная система, сколько энергии потребуется передатчику и насколько устойчивой будет связь в различных условиях. На практике кубсаты используют несколько стандартных участков спектра, каждый из которых занимает свою нишу.

Диапазоны VHF (30–300 МГц) и UHF (300–1000 МГц) исторически стали основой командно-телеметрических линий малых аппаратов. Наиболее активно применяются любительские участки 145–146 МГц и 435–438 МГц, а также выделенные коммерческие и экспериментальные полосы. Главное физическое преимущество этих частот – относительно небольшие потери в свободном пространстве. Сигнал ослабевает медленнее, чем на более высоких частотах, поэтому даже при мощности передатчика в единицы ватт и простых антеннах удаётся закрыть радиолинию с небольшими наземными станциями. Антенны на борту могут быть всенаправленными или слабонаправленными – четвертьволновыми монополями, диполями, «рулетками» из пружинной ленты. Это резко упрощает конструкцию: не требуется точное наведение аппарата на станцию, достаточно грубой стабилизации. Сигнал хорошо проходит через атмосферу и ионосферу, а широкая сеть любительских, университетских и коммерческих наземных станций по всему миру позволяет организовать

приём практически без строительства собственного большого комплекса. Типичные скорости передачи лежат в диапазоне 1,2–19,2 кбит/с, иногда достигая нескольких десятков килобит. Для команд, телеметрии состояния и небольших объёмов научных данных этого вполне достаточно.

Однако те же физические свойства оборачиваются ограничениями. Полосы частот в VHF/UHF узки и сильно загружены, поэтому выделить широкие каналы для высокоскоростной передачи сложно. Скорость остаётся низкой, и сбросить гигабайты снимков или измерений за короткий сеанс связи практически невозможно. Кроме того, на этих частотах заметнее влияние ионосферных эффектов и индустриальных помех, а размеры антенн, хотя и приемлемы, всё же требуют механизмов развёртывания. В результате VHF и UHF сегодня почти всегда используются как надёжный «служебный» канал – для управления, телеметрии и резервной связи, – тогда как основной поток данных полезной нагрузки уходит в более высокочастотные диапазоны.

S-диапазон (примерно 2–4 ГГц) занимает промежуточное положение и стал одним из самых востребованных решений для современных кубсатов. Потери в свободном пространстве здесь уже выше, чем в UHF, но ещё не настолько велики, чтобы требовать больших мощностей или очень острых лучей. Патч-антенны имеют удобные размеры – несколько сантиметров в стороне, – легко размещаются на гранях аппарата и обеспечивают коэффициент усиления порядка 5–9 дБи. Этого достаточно, чтобы при мощности передатчика в несколько ватт получать скорости от десятков килобит до нескольких мегабит в секунду. Атмосфера на этих частотах влияет умеренно, дождевое ослабление ещё не критично. Многие коммерческие трансиверы и готовые радиомодули для кубсатов рассчитаны именно на S-band, что упрощает разработку и сокращает сроки. Диапазон хорошо подходит как для расширенной телеметрии, так и для среднескоростного сброса данных полезной нагрузки – например, сжатых снимков или результатов научных измерений.

К недостаткам S-диапазона относится необходимость более аккуратного наведения, чем в UHF: хотя луч патч-антенны относительно широк, полностью всенаправленной связи уже нет. Кроме того, для действительно больших объёмов данных (десятки и сотни гигабайт за миссию) скорости S-band начинают ощущаться как ограничение. Тем не менее именно сочетание приемлемой скорости, умеренных требований к антеннам и широкой доступности оборудования сделало S-диапазон «рабочей лошадкой» многих прикладных кубсатовских миссий.

X-диапазон (8–12 ГГц) сегодня является основным средством высокоскоростного сброса данных с кубсатов дистанционного зондирования Земли. Здесь уже можно уверенно говорить о скоростях в десятки и даже сотни мегабит в секунду. Это позволяет за один пролёт над наземной станцией передавать значительные объёмы изображений и измерений. Компактные патч-антенны и небольшие антенные решётки обеспечивают заметное усиление, а размеры излучателей остаются совместимыми с форм-фактором 3U–12U. Многие современные миссии наблюдения Земли проектируются именно вокруг X-band как главного канала данных.

Платой за скорость становятся более жёсткие требования. Потери в свободном пространстве существенно выше, чем в S-band, поэтому либо нужна большая мощность передатчика, либо антенна с более высоким коэффициентом усиления и, соответственно, более узкой диаграммой направленности. Аппарат должен уметь достаточно точно наводиться на наземную станцию – ошибки в доли градуса уже начинают сказываться. Атмосферные эффекты, особенно ослабление в дожде, выражены сильнее. Наземный сегмент тоже усложняется: требуются более чувствительные приёмники и антенны большего диаметра. Несмотря на эти ограничения, для миссий, где объём данных является главным продуктом, X-диапазон остаётся наиболее рациональным выбором.

Ka-диапазон (примерно 27–40 ГГц) представляет следующее поколение высокоскоростных линий. Благодаря ещё более короткой длине волны антенны с высоким усилением получаются очень компактными. Это позволяет реализовывать скорости от сотен мегабит до единиц гигабит в секунду даже на небольших аппаратах. Демонстрационные миссии, такие как ISARA с комбинированной солнечной панелью и рефлекторной антенной, показали принципиальную возможность таких решений на кубсатах. Ka-band открывает путь к передаче практически «сырых» потоков данных с высокодетальной съёмки или широкополосных научных приборов.

Однако этот диапазон наиболее требователен к условиям работы. Атмосферное ослабление, особенно в дожде и при высокой влажности, может составлять десятки децибел и полностью разрывать линию. Поэтому связь в Ka-band сильно зависит от погоды над наземной станцией и требует либо резервирования по другим диапазонам, либо сети станций в разных климатических зонах. Наведение должно быть очень точным – луч антенны узок, и ошибка в доли градуса приводит к потере сигнала. Передатчики и высокочастотные тракты сложнее и дороже, выше требования к точности изготовления антенн. Всё это пока ограничивает широкое применение Ka-band на массовых кубсатах, но по мере развития технологий и наземной инфраструктуры диапазон будет занимать всё более заметное место в миссиях с экстремальными требованиями к объёму данных.

В итоге выбор частотного диапазона никогда не бывает абстрактным. Он определяется тем, сколько данных нужно доставить на Землю, как быстро это должно происходить, какая мощность и точность ориентации доступны на борту, какие наземные станции можно использовать и насколько критична непрерывность связи. VHF и UHF обеспечивают надёжное управление и телеметрию. S-band даёт хороший баланс скорости и сложности. X-band стал стандартом для высокоскоростного сброса данных наблюдения Земли. Ka-band обещает ещё более высокие скорости, но требует решения серьёзных атмосферных и навигационных задач. Грамотное сочетание нескольких диапазонов на одном аппарате – служебного UHF или S-band и высокоскоростного X- или Ka-band – позволяет одновременно сохранить надёжность управления и обеспечить доставку больших объёмов информации.

Антенно-фидерные системы

Антенна – это последний и часто самый заметный элемент радиолинии кубсата. От её типа, усиления, поляризации и способа размещения зависит, сколько мощности передатчика реально уйдёт в направлении наземной станции и насколько устойчивым будет приём слабого сигнала с Земли. На малом аппарате выбор антенны всегда представляет собой компромисс между электрическими характеристиками, механической сложностью, массой и влиянием на другие системы. Антенны кубсатов принято делить на фиксированные, которые не требуют развёртывания после выхода на орбиту, и разворачиваемые, которые в полётном положении сложены и раскрываются уже в космосе.

Патч-антенны, или микрополосковые излучатели, стали наиболее распространённым решением для диапазонов S и X. Конструктивно это металлическая пластина (излучающий элемент), отделённая тонким слоем диэлектрика от экрана. Антенна получается плоской, лёгкой, толщиной в миллиметры, и не требует никаких механизмов развёртывания. Её легко разместить на грани корпуса, на внутренней стороне солнечной панели или даже интегрировать в структуру панели. Типичный одиночный патч даёт коэффициент усиления 5–9 дБи – то есть направляет сигнал в несколько раз сильнее, чем идеальный всенаправленный излучатель. Если собрать несколько патчей в решётку, усиление можно поднять до 15–25 дБи и выше, получив уже довольно узкий луч. Патчи хорошо работают как с линейной, так и с круговой поляризацией, что важно для компенсации вращения аппарата и поляризационных эффектов в атмосфере. Главные достоинства – простота, надёжность, отсутствие подвижных частей и удобство интеграции. Недостатки связаны с относительно узкой полосой частот у простых конструкций и с тем, что при высоком усилении луч становится узким и требует более точного наведения аппарата на станцию. Кроме того, диэлектрическая подложка и металлические элементы должны выдерживать термоциклирование и радиацию без заметной деградации характеристик.

Отдельно стоит пояснить, что означает показатель дБи. Это децибелы относительно изотропного излучателя – гипотетической антенны, которая равномерно излучает во все стороны. Реальных изотропных антенн не существует, но они удобны как точка отсчёта. Если антенна имеет усиление 6 дБи, это значит, что в направлении максимума диаграммы она создаёт примерно в четыре раза более плотный поток мощности, чем изотропный излучатель при той же подводимой мощности. Именно поэтому даже небольшой прирост усиления антенны заметно улучшает бюджет радиолинии.

Для диапазонов VHF и UHF классическим решением остаются проволочные и ленточные антенны – диполи, монополи и так называемые «рулетки». Последние изготавливаются из пружинной измерительной ленты: в сложенном состоянии они занимают минимум места, а после подачи команды разворачиваются в прямые или слегка изогнутые излучатели. Турникетные (скрещенные) диполи и квадрифилярные конструкции дают почти всенаправленную диаграмму с усилением порядка 0–2 дБи. Такие антенны просты, дёшевы,

имеют огромный накопленный полётный опыт и позволяют работать без точного наведения аппарата. Именно поэтому они до сих пор незаменимы для командно-телеметрических линий. Платой за простоту является низкое усиление: почти вся мощность передатчика «размазывается» по сфере, и до наземной станции доходит лишь малая её часть. Кроме того, разворачиваемые конструкции требуют механизмов фиксации и расчековки, которые сами по себе являются источником риска – антенна может не раскрыться или раскрыться не полностью. Несмотря на эти недостатки, для служебных каналов VHF/UHF альтернативы с лучшим соотношением простоты и надёжности практически нет.

Спиральные (helical) и квадрифилярные антенны занимают промежуточное положение. Они обеспечивают круговую поляризацию – важное свойство, когда ориентация аппарата относительно наземной станции меняется, – и дают умеренное усиление, обычно от 3 до 12 дБи. Спираль можно выполнить как фиксированной, так и разворачиваемой. Квадрифилярные антенны часто применяют в UHF и нижнем S-диапазоне, где нужна более устойчивая связь, чем у простого диполя, но ещё нет возможности установить остронаправленную решётку. Достоинства – хорошее согласование с круговой поляризацией и более предсказуемая диаграмма. Недостатки – больший объём по сравнению с патчем, необходимость развёртывания в ряде конструкций и более сложная настройка.

Рупорные антенны появляются там, где требуется уже заметное усиление при относительно простой и широкой полосе частот – прежде всего в X- и Ka-диапазонах. Рупор представляет собой расширяющуюся металлическую трубу, которая плавно согласовывает волновод с свободным пространством. Он может быть фиксированным или установленным на простом поворотном устройстве. Рупоры надёжны, хорошо изучены и дают предсказуемые характеристики. Однако для получения высокого усиления размеры рупора растут, и на кубсате быстро возникает конфликт с ограничениями по объёму. Поэтому чистые рупоры на самых маленьких аппаратах встречаются реже, чем патч-решётки или комбинированные решения.

На верхнем уровне сложности находятся фазированные антенные решётки и рефлекторные антенны типа reflectarray. Фазированная решётка состоит из множества излучающих элементов, фазы сигналов которых управляются электронным способом. Это позволяет перемещать луч без механических приводов – важное преимущество, когда нужно быстро перенацеливаться или отслеживать станцию. Платой становятся сложность электроники, заметное энергопотребление и высокая стоимость. Reflectarray – плоская отражательная решётка – представляет собой поверхность, которая формирует нужный фазовый фронт отражённой волны. Особенно привлекательна возможность совместить такую решётку с солнечной панелью: одна и та же конструкция и вырабатывает энергию, и служит остронаправленной антенной. Миссия ISARA продемонстрировала жизнеспособность этого подхода. Высокое усиление таких антенн открывает путь к скоростям в сотни мегабит и выше, но требует очень точного наведения, тщательной калибровки и защиты от термодеформаций, которые могут «сбить» фазовое распределение.

Любая антенна соединяется с приёмопередатчиком фидерным трактом – кабелями, разъёмами, циркуляторами, фильтрами и иногда усилителями. В вакууме, при резких перепадах температуры и под действием радиации этот тракт не должен вносить больших потерь и не должен деградировать. Поэтому на кубсатах предпочитают полужёсткие коаксиальные кабели с качественной изоляцией и разъёмы стандартов SMA, SMP или их космические аналоги. Каждый лишний разъём и каждый лишний децибел потерь в фидере напрямую уменьшают запас радиолинии, поэтому проектирование тракта ведётся с тем же вниманием, что и выбор самой антенны.

В целом антенно-фидерная система кубсата – это не просто «кусок металла, который излучает». Это элемент, который связывает энергетику аппарата, систему ориентации, объём данных полезной нагрузки и возможности наземного сегмента. От удачного выбора типа антенны, её усиления и способа размещения во многом зависит, сможет ли миссия доставить на Землю тот объём информации, ради которого аппарат вообще запускали.

Энергетика радиолинии (Link Budget)

Любая система связи кубсата, какой бы современной она ни была, в конечном счёте подчиняется одному простому вопросу: хватает ли мощности сигнала, дошедшего до приёмника, для уверенного выделения информации. Ответ на этот вопрос даёт расчёт бюджета радиолинии – последовательный учёт всех усилений и потерь на пути от передатчика на борту до входа приёмника наземной станции. Без такого расчёта невозможно ни выбрать мощность передатчика, ни понять, какая антенна нужна, ни оценить, с какой скоростью можно передавать данные.

Расчёт бюджета радиолинии – основа проектирования любой системы связи. Он показывает, какая мощность сигнала дойдёт до приёмника, с учётом всех усилений и потерь на трассе. Уравнение в децибелах:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{\text{fs}} - L_{\text{atm}} - L_{\text{other}}$$

Где:

P_r – мощность на входе приёмника,
P_t – мощность передатчика,
G_t и G_r – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн,
L_{fs} – потери в свободном пространстве,
L_{atm} – атмосферные потери,
L_{other} – прочие потери (поляризационные, наведения, в фидерах и т.д.).

Ключевые параметры:

- **EIRP** (Equivalent Isotropically Radiated Power) = $P_t + G_t - L_{\text{фидер}}$;
- **G/T** наземной станции (добротность);
- требуемое отношение E_b/N_0 или C/N_0 для заданной вероятности ошибки.

Один из ключевых производных параметров – EIRP, эквивалентная изотропно излучаемая мощность. Она равна сумме мощности передатчика и усиления бортовой антенны (за вычетом потерь в фидере) и показывает, насколько «ярко» аппарат светит в сторону Земли. Чем выше EIRP, тем проще наземной станции принять сигнал. На другом конце линии стоит добротность наземной станции G/TG/TG/T – отношение усиления приёмной антенны к суммарной шумовой температуре системы. Высокая добротность означает, что станция хорошо «слышит» слабые сигналы. Произведение EIRP на G/TG/TG/T с учётом расстояния и потерь определяет отношение сигнал/шум на входе приёмника, а уже от него зависит, какую скорость передачи и какой запас по вероятности ошибки можно получить.

Сами по себе мощность и антенны ещё не гарантируют доставку данных. Нужно решить, каким способом информация будет «упакована» в радиосигнал. Это задача модуляции. Наиболее устойчивой и до сих пор широко применяемой остаётся двоичная фазовая манипуляция – BPSK. В ней каждый символ несёт один бит, зато сигнал очень хорошо переносит шум, помехи и неидеальности канала. BPSK выбирают, когда условия связи тяжёлые: большая дальность, низкая мощность, плохая погода или работа через небольшие наземные станции. Следующий шаг – квадратурная фазовая манипуляция QPSK и её разновидность OQPSK. Здесь уже два бита на символ, скорость передачи при той же полосе частот удваивается, а устойчивость к шуму остаётся приемлемой. Именно QPSK стала рабочим стандартом для многих среднескоростных линий кубсатов. Когда отношение сигнал/шум высокое и нужна максимальная скорость, переходят к более плотным схемам – 8PSK, 16-APSK, 32-APSK, которые используются в стандарте DVB-S2. Каждый следующий порядок позволяет передавать больше бит на символ, но требует всё более чистого сигнала. Поэтому на практике применяют адаптивную модуляцию: в хороших условиях включают плотную схему, а при ухудшении канала автоматически переходят на более робастную.

Даже при хорошей модуляции часть бит неизбежно искажается. Чтобы восстановить информацию, используют помехоустойчивое кодирование. Классическая связка космических линий – свёрточный код с длиной ограничения 7 и скоростью 1/2 в сочетании с кодом Рида–Соломона. Она хорошо изучена, относительно проста в реализации и даёт заметный выигрыш. Более современные подходы – турбокоды и коды с малой плотностью проверок на чётность (LDPC). Последние лежат в основе стандарта DVB-S2 и его расширений и по эффективности приближаются к теоретическому пределу Шеннона. На практике это означает, что при том же отношении сигнал/шум можно передавать данные быстрее или при той же скорости работать с меньшим запасом мощности. Современные высокоскоростные передатчики кубсатов всё чаще реализуют именно DVB-S2 с адаптивной модуляцией и кодированием (ACM). Система в реальном времени оценивает качество канала и выбирает наилучшую комбинацию модуляции и кода, максимально используя каждый пролёт над станцией.

Расчёт бюджета нельзя считать полным, если не учтены особенности среды распространения. На частотах VHF и UHF заметную роль играют ионосферные эффекты: мерцания сигнала, дополнительные задержки и вращение плоскости поляризации. Они могут вызывать

кратковременные провалы уровня и ошибки, особенно при работе с линейно поляризованными антеннами. В S-диапазоне влияние ионосферы уже слабее, а тропосферные эффекты ещё не доминируют, поэтому условия относительно комфортные. В X-диапазоне и особенно в Ka-диапазоне главными становятся тропосферные явления – ослабление в дожде, облаках и атмосферных газах. При сильном дожде потери в Ka-band могут достигать десятков децибел и полностью разрывать линию. Поэтому для высоких частот либо закладывают большой запас мощности, либо используют сеть наземных станций в разных климатических зонах, либо комбинируют Ka-band с более низкочастотным резервным каналом.

Дополнительно приходится учитывать эффект Доплера. На низкой орбите кубсат движется со скоростью около 7,5 км/с, и сдвиг частоты на X- и Ka-диапазонах составляет десятки килогерц. Приёмник должен уметь быстро захватывать и сопровождать уходящий сигнал. Ошибки наведения антенн – как бортовой, так и наземной – тоже входят в бюджет как дополнительные потери. Даже небольшая ошибка в доли градуса на узком луче антенны с высоким усилением может «съесть» несколько децибел. Поляризационные потери возникают, когда ориентация векторов поляризации на передаче и приёме не совпадает; их уменьшают, используя круговую поляризацию.

Грамотно рассчитанный бюджет радиолинии всегда содержит запас – обычно не менее 3–6 дБ, а часто и больше. Этот запас компенсирует неточности моделей, деградацию аппаратуры со временем, неидеальные условия распространения и возможные сбои. Только при наличии такого запаса можно говорить об устойчивой связи на протяжении всей миссии. В итоге система связи современных кубсатов прошла путь от простых телеметрических каналов на любительских частотах с дипольными антеннами до сложных высокоскоростных линий X- и Ka-диапазонов с патч-решётками, LDPC-кодированием и адаптивной модуляцией. Именно качество радиолинии во многом определяет, какой объём научных и прикладных данных в реальности удастся доставить на Землю, а значит – насколько успешным окажется весь полёт.

Часть III. Патофизиология, эволюция и жизненный цикл

Если первые две части обзора были посвящены тому, как кубсат устроен и как он функционирует в номинальных условиях, то третья часть обращается к вопросам его «болезни», старения и завершения жизненного пути. Космическая среда непрерывно воздействует на аппарат: радиация вызывает накопленные и одиночные отказы электроники, атомарный кислород разрушает полимеры, вакуум провоцирует дегазация, а многократные термоциклы создают механическую усталость. Одновременно с этим сам аппарат проходит путь от первых оборотов на орбите до постепенной деградации ключевых систем и, наконец, до этапа, когда миссия должна быть корректно завершена.

Понимание этих процессов – не академическое упражнение, а практическая необходимость. Именно оно позволяет закладывать адекватные запасы, строить отказоустойчивую архитектуру и проектировать конец миссии так, чтобы кубсат не превращался в долгоживущий космический мусор. В этой части последовательно рассматриваются механизмы поражения среды, методы повышения живучести и принципы управления полным жизненным циклом аппарата.

9. Влияние агрессивной космической среды (Патофизиология)

Космическая среда для кубсата – это агрессивная «патогенная» среда, которая непрерывно воздействует на материалы, покрытия, электронику и механические соединения. В отличие от крупных аппаратов, где можно позволить себе толстую радиационную защиту, специальные радиационно-стойкие компоненты и значительные запасы по ресурсу, кубсаты вынуждены работать в условиях жёстких ограничений по массе, объёму и стоимости. Поэтому они широко используют коммерческую элементную базу (COTS), тонкостенные конструкции и полимерные материалы. Это делает их особенно уязвимыми.

Основные факторы поражения – ионизирующая радиация и специфические условия низкой и сверхнизкой околоземной орбиты: атомарный кислород, глубокий вакуум и многократно повторяющиеся экстремальные температурные циклы. Эти воздействия удобно рассматривать как «патофизиологию» аппарата – совокупность процессов, которые постепенно или внезапно снижают работоспособность и в конечном счёте могут привести к отказу. Понимание этих механизмов необходимо не для того, чтобы полностью устранить их (это часто невозможно), а для того, чтобы грамотно ограничить последствия и обеспечить выполнение миссии в течение заданного срока.

Радиационные эффекты

Радиационное поле на околоземных орбитах формируется несколькими источниками. Основной вклад на высотах 400–600 км дают захваченные частицы радиационных поясов Ван Аллена – электроны и протоны. К ним добавляются галактические космические лучи (ядра

высоких энергий) и спорадические потоки частиц солнечных вспышек и корональных выбросов массы. Для типичных кубсатовских орбит именно электроны и протоны поясов, а также вторичное излучение, возникающее при взаимодействии первичных частиц с материалом аппарата, определяют как накопленную дозу, так и частоту одиночных сбоев.

Накопленная доза (Total Ionizing Dose, TID).

Накопленная доза (TID) является интегральным эффектом ионизации, накапливающийся за время полёта. Заряженные частицы, проходя через оксиды и диэлектрики микросхем, создают электронно-дырочные пары. Часть заряда захватывается ловушками, что приводит к сдвигу пороговых напряжений транзисторов, росту токов утечки, деградации усилителей, АЦП, источников опорного напряжения и в итоге – к параметрическому или функциональному отказу. Для кубсатов на LEO за один–три года типичные уровни дозы составляют от нескольких до нескольких десятков крад (Si). За защитой корпуса из алюминия толщиной 1–2 мм доза от электронов заметно снижается, потому что электроны относительно легко поглощаются. Протоны и тяжёлые ионы ослабляются хуже, поэтому полностью «убрать» TID экранированием на кубсате невозможно.

Защита обеспечивается:

- алюминиевым экранированием корпуса (даже 1–2 мм Al существенно снижают дозу от электронов);
- выбором компонентов с известной радиационной стойкостью;
- схемотехническими решениями (запас по параметрам, компенсация дрейфов).

Большинство современных COTS-компонентов сохраняют работоспособность при 10–30 крад, отдельные семейства – до 50–100 крад. Этого часто хватает для миссий длительностью один–три года на орбитах 400–600 км. Однако разработчику нельзя полагаться на «типичные» цифры. Реальная доза зависит от высоты, наклонения, солнечной активности и толщины защиты в конкретном месте расположения компонента. Поэтому на этапе проектирования выполняют расчёт дозы (например, с помощью инструментов SPENVIS, OMERE, CREME или коммерческих аналогов) для выбранной орбиты и конструкции. По результатам расчёта определяют, какие компоненты требуют дополнительного локального экранирования, какие – замены на более стойкие, а где достаточно схемотехнического запаса по параметрам.

Одиночные сбои (Single Event Effects, SEE).

Высокоэнергетические частицы – прежде всего тяжёлые ионы и протоны – могут вызвать мгновенные эффекты, не связанные с накоплением дозы:

- **SEU (Single Event Upset)** – переключение состояния триггера или ячейки памяти (bit flip). Наиболее частый эффект в SRAM, регистрах процессоров и конфигурационной памяти FPGA.

- **SEL (Single Event Latch-up)** – тиристорное защёлкивание в КМОП-структурах, приводящее к резкому росту тока потребления. Без быстрого отключения питания может вызвать тепловое разрушение кристалла.
- **SEFI (Single Event Functional Interrupt)** – функциональный сбой (зависание процессора, потеря конфигурации).
- Более редкие, но опасные – SEB (Single Event Burnout) и SEGR (Single Event Gate Rupture) в силовых транзисторах.

Наиболее распространённый – Single Event Upset (SEU): частица отдаёт энергию в чувствительном объёме ячейки памяти или триггера, и логическое состояние переключается (bit flip). SEU особенно опасны в SRAM, регистрах процессоров, кэш-памяти и конфигурационной памяти FPGA. Single Event Latch-up (SEL) – тиристорное защёлкивание в КМОП-структурах. Возникает паразитная структура, ток потребления резко растёт, и без быстрого отключения питания кристалл может подвергнуться тепловому разрушению. Single Event Functional Interrupt (SEFI) проявляется как зависание процессора, сброс или потеря конфигурации без обязательного разрушения. В силовых транзисторах возможны более редкие, но тяжёлые эффекты – Single Event Burnout (SEB) и Single Event Gate Rupture (SEGR), приводящие к необратимому отказу.

Для разработчика важно понимать, что частота SEE зависит не только от орбиты, но и от чувствительности конкретных микросхем. Даже внутри одного семейства COTS разброс может быть большим. Поэтому критичные компоненты по возможности тестируют на ускорителях тяжёлых ионов или протонов, либо опираются на имеющиеся данные испытаний. Если данных нет, закладывают консервативные предположения и усиливают системную защиту.

Методы защиты.

Полностью радиационно-стойкие (rad-hard) компоненты решают проблему радикально, но они дороги, часто отстают по производительности и доступности, а номенклатура их ограничена. Поэтому в кубсатах преобладает подход Radiation Hardening by Design (RHBD) в сочетании с системными мерами. На уровне кристалла и платы применяют тройное модульное резервирование (TMR) наиболее критичных узлов: три идентичных канала работают параллельно, результат выбирается голосованием. В памяти используют коды коррекции ошибок (ECC, EDAC), способные исправлять одиночные и обнаруживать двойные ошибки. Конфигурацию FPGA и содержимое важных областей памяти периодически обновляют (scrubbing), чтобы устранять накопившиеся SEU. Внешние и внутренние сторожевые таймеры перезапускают процессор при зависании.

Для защиты от SEL ставят быстродействующие схемы контроля тока и отключения питания отдельной микросхемы или целой линии. На системном уровне работают алгоритмы FDIR: обнаружение аномалии, изоляция неисправного узла, переключение на резерв или переход в безопасный режим. Наконец, важную роль играет отбор и дополнительная проверка партий

COTS-компонентов (upscreening) – отбраковка заведомо слабых экземпляров до установки на аппарат.

Практика показывает, что комбинация этих мер позволяет успешно эксплуатировать преимущественно коммерческую электронику на LEO в течение нескольких лет. Ключ к успеху – не попытка сделать каждый чип «неуязвимым», а построение системы, которая продолжает выполнять миссию даже при периодических сбоях отдельных элементов.

Деградация в условиях VLEO/LEO

Помимо радиации, на низких и сверхнизких орбитах действуют специфические факторы, связанные с остаточной атмосферой и вакуумом. Здесь аппарат движется на границе плотных слоёв атмосферы, где ещё сохраняется заметное количество атомарного кислорода, а давление уже настолько мало, что любые летучие вещества свободно покидают материалы и могут осаждаться на соседних поверхностях. Одновременно каждые полтора часа конструкция переживает резкий переход от солнечного нагрева к глубокому охлаждению в тени. Эти воздействия не вызывают мгновенных катастрофических отказов, подобно некоторым радиационным эффектам, но медленно и неуклонно меняют свойства материалов, покрытий и соединений.

Для кубсатов, построенных с широким использованием полимеров, тонких плёнок, клеев и коммерческой элементной базы, именно эта группа факторов часто оказывается не менее опасной, чем накопленная доза. Эрозия внешних поверхностей, загрязнение оптики продуктами дегазации и усталость от тысяч термоциклов способны за месяцы и годы заметно ухудшить энергобаланс, точность датчиков и механическую целостность развёртываемых элементов. Поэтому проектирование аппарата для LEO и тем более для VLEO требует явного учёта атомарного кислорода, требований по газовыделению и последствий многократного цикла смены температуры ещё на ранних стадиях выбора материалов и компоновки

Атомарный кислород (Atomic Oxygen, AO).

Ниже примерно 600–700 км атмосфера содержит заметное количество атомарного кислорода. Кубсат движется со скоростью около 7,8 км/с, поэтому атомы кислорода сталкиваются с поверхностью с кинетической энергией порядка 5 эВ. Этого достаточно для химической эрозии многих органических материалов – полиимида (Kapton), эпоксидных смол, некоторых лаков, полимерных плёнок солнечных панелей и клеев. Эрозия проявляется как потеря массы, увеличение шероховатости, изменение коэффициентов поглощения и излучения (α/ε) и снижение механической прочности. В диапазоне очень низких орбит (VLEO, ниже ~350 км) поток атомарного кислорода особенно велик, и незащищённый Kapton может терять сотни микрометров толщины за год.

Для разработчика это означает, что все внешние полимерные поверхности, особенно обращённые в направлении движения, должны быть либо защищены специальными

покрытиями (SiO_x, силоксаны, silsesquioxane-материалы), либо металлизированы, либо заменены на более стойкие материалы. Ориентация чувствительных элементов и запас по толщине покрытий закладываются уже на этапе компоновки.

Глубокий вакуум и дегазация (outgassing).

В вакууме в вакууме, когда давление становится ниже примерно 10^{-4} паскаля (обычное атмосферное давление у поверхности Земли составляет около 100 000 Па) из конструкционных и технологических материалов начинают интенсивно выделяться летучие вещества – остатки влаги, пластификаторы, растворители, продукты отверждения. Это остатки влаги, адсорбированной при сборке и хранении, пластификаторы из полимеров, растворители, не до конца прореагировавшие компоненты клеев и компаундов, а также продукты дальнейшего отверждения и деструкции, могут конденсироваться на холодных поверхностях: объективах камер, датчиках, термооптических покрытиях, контактных площадках. В обычных земных условиях эти вещества либо остаются в объёме материала, либо медленно уходят в атмосферу. В космосе они свободно покидают поверхность и распространяются внутри объёма аппарата и за его пределами.

Загрязнение ухудшает оптические характеристики, меняет α/ε и в ряде случаев создаёт риск электрических пробоев в высоковольтных цепях. Поэтому все материалы, применяемые в кубсате, должны удовлетворять критериям низкого газовыделения (ASTM E595 или эквивалент): суммарная потеря массы TML $\leq$ 1 %, собранные летучие конденсируемые вещества CVCM $\leq$ 0,1 %. Перед установкой критичных приборов и перед лётными испытаниями проводят термовакуумный bake-out – прогрев в вакууме, который удаляет основную часть летучих компонентов. Игнорирование этих требований приводит к постепенной деградации оптики и тепловых покрытий уже в первые месяцы полёта.

Конденсация этих веществ на холодных поверхностях представляет особую опасность. Объективы камер, входные окна датчиков, термооптические покрытия, контактные пары разъёмов и открытые оптические поверхности стар-трекеров часто оказываются самыми холодными элементами в тени или при направленном излучении в космос. На них летучие компоненты оседают тонким налётом. Даже слой толщиной в доли микрометра способен заметно ухудшить пропускание оптики, изменить коэффициенты поглощения и излучения покрытий, увеличить рассеяние света и снизить чувствительность приборов. В высоковольтных цепях продукты дегазации могут способствовать поверхностным утечкам и повышать риск электрических пробоев.

Поэтому к материалам, применяемым в кубсатах, предъявляют жёсткие требования по газовыделению. Стандартным критерием служит методика ASTM E595 или её эквиваленты: суммарная потеря массы (Total Mass Loss, TML) не должна превышать 1 %, а количество собранных летучих конденсируемых веществ (Collected Volatile Condensable Material, CVCM) – 0,1 %. Материалы, не укладывающиеся в эти пределы, либо исключают, либо допускают только после дополнительного согласования и с пониманием риска. На практике это касается

не только основных конструкционных полимеров, но и проводов, трубок, маркеров, клеев, заливок, термоинтерфейсных паст и даже некоторых смазок.

Одних сертификатов на материал, однако, недостаточно. Перед установкой критичных оптических приборов и перед финальными лётными испытаниями проводят термовакуумный bake-out – длительный прогрев собранного узла или всего аппарата в вакууме. При повышенной температуре летучие компоненты уходят быстрее, и основная их часть удаляется ещё на Земле. Режим bake-out выбирают так, чтобы не повредить электронику и покрытия, но при этом максимально очистить объём. После такой процедуры повторное газовыделение на орбите существенно снижается.

Игнорирование требований по outgassing проявляется уже в первые месяцы полёта. Постепенно «садится» чувствительность камер, уходят калибровки оптических датчиков, меняется тепловой режим из-за изменения α/ε поверхностей, появляются аномалии в работе высоковольтных узлов. Исправить это с Земли невозможно. Поэтому контроль газовыделения материалов, правильный выбор комплектующих и обязательный bake-out критичных сборок остаются одними из базовых правил, которые отделяют надёжный кубсат от аппарата, теряющего работоспособность раньше расчетного срока.

Температурные качели (термоциклинг).

На низкой орбите аппарат каждые примерно 90 минут переходит из полностью освещённого состояния в тень и обратно. Температура внешних поверхностей при этом может меняться на 100 °C и более. Внутренние объёмы имеют цикл с меньшей амплитудой, но тоже постоянно. Такое многократное термоциклирование вызывает термомеханические напряжения, усталость материалов, циклические деформации паяных соединений и клеевых швов, изменение параметров электроники и датчиков, растрескивание покрытий и деградацию солнечных элементов. Температура внешних поверхностей может меняться на 100 °C и более. Это вызывает:

- термомеханические напряжения и усталость материалов;
- циклические деформации паяных соединений и клеевых швов;
- изменение параметров электроники и датчиков;
- риск растрескивания покрытий и солнечных элементов.

Особенно опасен момент выхода из тени – так называемый термоудар, когда освещённые поверхности быстро нагреваются, а внутренние конструкции ещё остаются холодными. Разница температур создаёт значительные градиенты и напряжения. Снизить последствия позволяют: пассивная и активная терморегуляция, подбор материалов с близкими коэффициентами линейного расширения, гибкие тепловые интерфейсы, правильное размещение тепловыделяющих элементов и достаточный запас прочности в механических и электрических соединениях. На этапе квалификации термоциклические испытания (часто в составе термовакуумных) являются обязательными и должны воспроизводить как минимум ожидаемое число циклов с запасом.

«Патофизиология» кубсата – это сочетание медленных процессов накопления повреждений (накопленная доза, эрозия атомарным кислородом, дегазация, усталость от многочисленных циклов смены температуры) и внезапных событий (одиночные сбои). Успешная миссия строится не на иллюзии полной неуязвимости каждого компонента, а на системном подходе: расчёте реальных уровней воздействия для выбранной орбиты, отборе и при необходимости дополнительной проверке материалов и электронных компонентов, применении схемотехнической и алгоритмической защиты, грамотном тепловом и механическом проектировании. Именно такое понимание среды и способов противодействия ей позволяет создавать аппараты, которые выполняют задачи в течение месяцев и лет, даже будучи построенными преимущественно на коммерческой элементной базе и в жёстких массогабаритных ограничениях.

10. Эволюция и адаптация (Жизненный цикл и надёжность)

Жизненный цикл кубсата – от момента отделения от ракеты-носителя до окончательного схода с орбиты – представляет собой непрерывный процесс «эволюции и адаптации». Аппарат должен не только выполнить свою миссию, но и сохранять работоспособность в условиях деградации, а по её завершении – безопасно покинуть орбиту, не создавая дополнительного космического мусора. В этом разделе рассматриваются три ключевых аспекта: обеспечение надёжности (выживаемости), неизбежная энтропия и деградация ключевых подсистем, а также стратегии завершения жизненного цикла.

Выживаемость (Reliability): анализ отказов и резервирование

Надёжность кубсатов исторически заметно ниже, чем у классических космических аппаратов. Крупные спутники проектируют с большими запасами, длительными циклами квалификации, широким применением радиационно-стойкой элементной базы и многоуровневым резервированием. Кубсаты, напротив, изначально создавались в логике быстрых и относительно недорогих миссий. Широкое использование коммерческих компонентов (COTS), сжатые сроки разработки, ограниченные бюджеты на наземные испытания и нередко недостаточный опыт команд приводят к тому, что часть скрытых дефектов и неучтённых взаимодействий проявляется уже на орбите.

Статистика запусков последних полутора десятилетий показывает характерную картину: значительная доля отказов приходится на первые недели и месяцы полёта. Этот период называют «младенческой смертностью». Именно тогда выявляются ошибки в последовательности развёртывания, проблемы с питанием после отделения, сбои в логике Safe Mode, незавершённые механики антенн и панелей, а также ранние проявления радиационных и тепловых эффектов, которые не были в полной мере воспроизведены на Земле. Если аппарат пережил первые один–три месяца, вероятность его дальнейшей работы существенно возрастает, хотя медленная деградация батареи, панелей и электроники продолжает накапливаться.

Для разработчика это означает, что борьба за надёжность должна быть сосредоточена не только на «долгом» ресурсе, но и на самых ранних этапах миссии. Тщательная отработка последовательности отделения и развёртывания, проверка энергобаланса в худших условиях, тестирование переходов в Safe Mode, контроль газовыделения и термоциклирование критичных узлов снижают вероятность раннего отказа. Опыт успешных команд показывает: даже при использовании COTS и жёстких ограничений по срокам можно добиться приемлемой надёжности, если системно закрывать именно те риски, которые статистически чаще всего «убивают» кубсаты в начале полёта.

Анализ видов и последствий отказов (FMEA/FMECA).

Анализ видов и последствий отказов» (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA и анализ видов, последствий и критичности отказов (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, FMECA) относятся к базовым инструментам системной инженерии надёжности. Суть метода состоит в том, чтобы заранее, ещё на этапе проектирования, систематически перечислить возможные виды отказов каждого элемента, понять их причины, проследить последствия для соседних узлов и для миссии в целом, а затем оценить, насколько этот отказ вероятен, насколько он тяжёл и можно ли его вовремя обнаружить. Для каждой функции и компонента определяются:

- возможные виды отказов;
- причины и механизмы;
- последствия для подсистемы и миссии в целом;
- вероятность возникновения;
- серьёзность последствий;
- возможность обнаружения.

В классическом FMEA для каждого компонента или функции задают вопросы: что может отказать, почему это происходит, что будет с системой, если отказ случится, и как его заметить. FMECA добавляет количественную или полуколичественную оценку критичности – комбинацию вероятности, тяжести последствий и возможности обнаружения. В результате появляется ранжированный список рисков: наверху оказываются отказы, которые одновременно достаточно вероятны, сильно бьют по миссии и плохо обнаруживаются телеметрией.

На кубсатах этот инструмент особенно полезен precisely потому, что ресурсы на полное резервирование ограничены. FMEA/FMECA помогает решить, куда направить усилия: какой узел стоит продублировать, где достаточно усилить тестирование, а где нужно улучшить телеметрию и алгоритмы FDIR. Анализ проводят итеративно – сначала на уровне подсистем, затем на уровне всего аппарата – и обновляют по мере появления результатов испытаний и изменения конструкции. Когда метод применяют всерьёз, а не формально, он становится одним из главных способов превратить набор разрозненных технических решений в систему с осознанно управляемой надёжностью.

На основе этих оценок рассчитывается приоритетное число риска (RPN) или аналогичные показатели, позволяющие ранжировать критические элементы и направлять ресурсы на их усиление. В современных проектах FMECA всё чаще интегрируется в модель-ориентированную системную инженерию (MBSE), что позволяет автоматически генерировать деревья отказов и обновлять анализ при изменении конструкции.

Резервирование.

Из-за жёстких ограничений по массе, объёму и энергопотреблению полное дублирование всех подсистем на кубсатах редко возможно. Применяются следующие стратегии:

- Холодное резервирование (cold redundancy) – резервный модуль обесточен и включается только при отказе основного. Экономит энергию, но требует времени на активацию и проверку.
- Горячее резервирование (hot redundancy) – оба модуля работают параллельно, выход формируется по мажоритарному принципу или с переключением. Обеспечивает мгновенную реакцию, но удваивает потребление.
- Тёплое резервирование (warm redundancy) – резервный модуль находится в частично активном состоянии (например, прогрет или синхронизирован), что ускоряет переход при отказе.

На практике в кубсатах резервируют прежде всего те элементы, отказ которых сразу приводит к потере миссии. Чаще всего дублируют приёмник командной радиолинии: без возможности получить команду с Земли аппарат быстро становится неуправляемым. Резервируют отдельные каналы питания и ключевые преобразователи, чтобы короткое замыкание или отказ одного модуля не обесточил весь спутник. В системе ориентации иногда ставят дополнительные датчики или оставляют возможность работать по сокращённому набору измерений. Память критичных программ и данных защищают кодами коррекции ошибок, а в более сложных компьютерах применяют резервирование вычислений или конфигурации FPGA. Полное горячее дублирование всех подсистем на кубсате почти никогда не делают – на это не хватает массы, объёма и энергии.

При этом опыт показывает, что простое аппаратное резервирование далеко не всегда даёт наибольший выигрыш в надёжности. Значительная часть ранних отказов связана не с внезапным разрушением компонента, а с «детскими» ошибками: неправильной последовательностью развёртывания, неучтённым режимом энергопотребления, сбоем в логике Safe Mode, плохим контактом в разъёме или недостаточной отработкой поведения системы при одном конкретном отказе. Устранение таких ошибок требует тщательного тестирования, проверки аварийных сценариев, термовакуумных и вибрационных испытаний, а также анализа телеметрии на этапе разработки. Вложение ресурсов именно в эти мероприятия часто повышает вероятность успешного полёта сильнее, чем добавление ещё одного резервного блока, который сам по себе может внести новые отказы и усложнить систему. Поэтому современный подход к надёжности кубсатов сочетает ограниченное,

хорошо обоснованное резервирование критичных узлов с глубокой отработкой поведения аппарата в нештатных ситуациях.

Энтропия и деградация

Даже при идеальной работе всех систем кубсат подвержен постепенной деградации – росту «энтропии» его функциональных возможностей. В отличие от внезапных отказов, которые можно хотя бы частично парировать резервированием и алгоритмами FDIR, эта деградация накапливается медленно и почти неизбежно. Солнечные панели год за годом теряют мощность, аккумуляторы удерживают всё меньше заряда, параметры электроники плывут под действием радиации, механические узлы изнашиваются, покрытия меняют свои оптические свойства. В какой-то момент запасов, заложенных при проектировании, начинает не хватать: энергобаланс сходится уже с трудом, точность ориентации падает, объём передаваемых данных сокращается. Для кубсата, изначально имеющего небольшие ресурсные запасы, такая постепенная утрата возможностей особенно заметна и часто определяет реальный, а не паспортный срок активной работы.

Снижение ёмкости аккумуляторных батарей.

Литий-ионные и литий-железо-фосфатные ($LiFePO_4$, LFP) аккумуляторы на низкой орбите работают в особенно тяжёлом режиме. Каждые примерно 90 минут происходит цикл «заряд на свету – разряд в тени», и за год набираются тысячи таких мелких циклов. К этому добавляются постоянные колебания температуры и воздействие радиации. В результате ёмкость постепенно снижается, а внутреннее сопротивление растёт. Типичная скорость потери ёмкости составляет несколько процентов в год, однако при работе вне оптимального температурного диапазона, при глубоких разрядах или высоких токах деградация ускоряется. Рост сопротивления приводит к дополнительным потерям и нагреву, что ещё сильнее ускоряет старение – возникает положительная обратная связь. К концу миссии доступная ёмкость нередко падает на 20–40 % и более, напрямую ограничивая возможности полезной нагрузки и длительность сеансов связи.

Среди распространённых химических систем для кубсатов LFP заметно лучше переносит именно типичный LEO-профиль с тысячами мелких циклов. Ячейки на основе никеля-марганца-кобальта (NMC) и никеля-кобальта-алюминия (NCA) имеют более высокую удельную энергию, но быстрее теряют ёмкость и сильнее чувствительны к температуре. Испытания в условиях, имитирующих орбитальный цикл, показывают, что LFP сохраняет работоспособность после нескольких тысяч циклов с умеренной потерей ёмкости, тогда как NMC и NCA чаще выходят из строя из-за роста внутреннего сопротивления или срабатывания внутренних защит. Поэтому для миссий, где важнее ресурс, чем максимальная энергоёмкость, LFP часто оказывается предпочтительным выбором.

Важную роль играет система управления батареей (BMS). Она ограничивает токи и напряжения, балансирует ячейки, не допускает глубокого разряда и при необходимости

блокирует заряд при слишком низкой температуре. Современные подходы включают более точную оценку состояния заряда и здоровья батареи, а также элементы прогнозной диагностики. Появляются работы, в которых для этих целей используют цифровые двойники – модели, постоянно уточняемые по телеметрии и позволяющие заранее оценивать остаточный ресурс.

Среди новых технологических направлений, которые начинают проникать в кубсаты, можно выделить несколько. Гибридные накопители, сочетающие литий-ионную батарею с суперконденсаторами, позволяют сглаживать пики потребления и снижать глубину разряда основного аккумулятора, тем самым продлевая его жизнь. Суперконденсаторы хорошо переносят большие токи и низкие температуры, хотя сами по себе имеют малую энергоёмкость. Ведутся работы по применению более совершенных электролитов, в том числе рассчитанных на работу при пониженных температурах, а также по отбору и дополнительной проверке коммерческих ячеек формата 18650 и других, уже имеющих обширный лётный опыт. В более отдалённой перспективе рассматриваются твердотельные батареи и системы на основе литий-серных электрохимий, обещающие более высокую удельную энергию и расширенный температурный диапазон, однако для массового применения на кубсатах они пока остаются на стадии исследований и отдельных демонстраций.

Для разработчика практический вывод ясен. При проектировании энергосистемы нужно закладывать запас по ёмкости с учётом деградации к концу миссии, тщательно выбирать химию ячеек под профиль полёта, обеспечивать хороший тепловой режим батареи и не экономить на качестве BMS. Именно аккумулятор часто оказывается тем элементом, который первым ограничивает реальный срок активной работы кубсата, даже если все остальные системы продолжают функционировать.

Деградация солнечных панелей.

Основные факторы деградации солнечных панелей кубсата на низкой орбите – радиационное повреждение (протоны и электроны радиационных поясов), ультрафиолетовое излучение, атомарный кислород для незащищённых поверхностей, загрязнение продуктами дегазации и постоянное термоциклирование. Каждый из этих факторов по-своему снижает мощность. Радиация создаёт дефекты в полупроводниковой структуре и уменьшает ток короткого замыкания и напряжение холостого хода. Ультрафиолет и атомарный кислород разрушают полимерные покрытия и клеи, меняют оптические свойства защитных стёкол и подложек. Загрязнение оптики и покрытий уменьшает количество света, доходящего до активной зоны. Термоциклы вызывают механические напряжения в паяных и клеевых соединениях и могут приводить к микротрещинам.

Тройные каскадные элементы на основе GaInP/GaAs/Ge остаются «золотым стандартом» для большинства серьёзных кубсатовских миссий. Они заметно устойчивее обычных кремниевых

элементов: типичная потеря мощности составляет примерно 2–5 % в первый год и может доходить до 10–20 % за несколько лет в зависимости от высоты орбиты, наклонения и толщины защитного покрытия. Кремниевые панели деградируют быстрее, особенно на орбитах ниже 500 км, где поток атомарного кислорода и мягкой радиации выше; по данным телеметрии и моделей, потери за полгода могут достигать 8–12 % и более. Именно поэтому при расчёте энергобаланса систему всегда проектируют исходя из мощности на конец жизни (EOL), а не из начальных характеристик. Запас по генерации закладывают так, чтобы даже после ожидаемой деградации средний приход энергии перекрывал потребление.

Защита панелей на кубсатах решается несколькими способами. На элементы ставят тонкие защитные стёкла (coverglass) с просветляющими и токопроводящими покрытиями, которые ослабляют воздействие ультрафиолета и частично радиации. Для поверхностей, подверженных атомарному кислороду, применяют специальные покрытия или выбирают материалы, более устойчивые к эрозии. Важна и ориентация: панели, постоянно смотрящие в направлении движения на очень низких орбитах, разрушаются быстрее. Тепловой режим тоже влияет – перегрев ускоряет часть процессов деградации, поэтому панели стараются не перегревать и обеспечивают хороший теплоотвод.

Среди относительно новых подходов, которые обсуждаются и частично уже пробуют на малых аппаратах, можно отметить несколько направлений. Во-первых, возврат интереса к усовершенствованным кремниевым элементам (в том числе с структурами типа PERC и HJT): они заметно дешевле тройных каскадов, а при коротких миссиях и правильной защите их более быстрая деградация может быть приемлемой. Во-вторых, исследования ультратонких GaAs-элементов и конструкций с улучшенным управлением светом, которые обещают лучшую радиационную стойкость при меньшей массе. В-третьих, перовскитные элементы: в лабораторных условиях они показывают высокую эффективность и определённую устойчивость к радиации, но пока остаются на стадии экспериментов из-за вопросов стабильности, вакуумного поведения и квалификации. Наконец, совершенствуются покрытия и методы герметизации, снижающие влияние атомарного кислорода и загрязнений.

Для разработчика кубсата практический смысл всего этого сводится к нескольким правилам. Нужно заранее выбрать тип элементов под срок миссии и орбиту, заложить реалистичный запас по EOL-мощности, обеспечить адекватную защиту coverglass и покрытий и не забывать, что деградация панелей – один из главных долгосрочных факторов, ограничивающих энергобаланс. Даже самые совершенные элементы со временем теряют мощность, и миссия должна оставаться выполнимой до последнего запланированного дня работы.

Механический износ приводов.

Механический износ приводов остаётся одним из скрытых, но важных факторов ограничения срока службы кубсата. Реакционные колёса, механизмы развёртывания солнечных панелей и антенн, клапаны двигательных установок работают в вакууме, при резких перепадах температуры и под действием радиации на их электронику. В этих условиях классические

представления о смазке и ресурсе подшипников, справедливые для земной атмосферы, перестают работать.

Наиболее чувствительный элемент – подшипники реакционных колёс. В вакууме жидкая смазка либо медленно испаряется, либо оттесняется из зоны контакта, и режим смазки переходит в граничный. Возникает износ дорожек и тел качения, растёт момент сопротивления, появляются вибрации и шум. Со временем это ухудшает точность стабилизации и увеличивает потребление энергии. Радиация дополнительно влияет на электронику приводов и датчиков скорости, а термоциклирование создаёт переменные нагрузки на валы и посадочные места. В результате даже исправное с виду колесо к концу миссии может работать хуже, чем в начале.

Механизмы одноразового или малоциклового действия – пружинные и торсионные шарниры, burn-wire, актуаторы на сплавах с памятью формы (SMA), пиро- или электромеханические замки – имеют другой характер ограничений. Их ресурс определяется числом срабатываний, стабильностью свойств материала после хранения и способностью сработать после вибраций выведения и длительного пребывания в вакууме. Отказ одного такого механизма часто означает потерю панели, антенны или возможности открыть клапан, то есть существенную деградацию миссии. Поэтому к ним предъявляют требования по гарантированному срабатыванию с запасом, а не по многолетнему непрерывному ресурсу.

Для снижения этих рисков используют несколько подходов. В реакционных колёсах применяют специальные вакуумные смазки с крайне низким давлением паров, иногда – системы с ограниченным резервом смазки, а также более тщательный отбор и приработку подшипников. Ведутся разработки колёс с твердой смазкой (например, на основе PTFE и полимерных материалов), которые лучше переносят длительные паузы без вращения и не зависят от сохранности масляной плёнки. В механизмах развёртывания стараются минимизировать число трущихся пар, использовать покрытия, снижающие риск холодной сварки и заедания, и тщательно отрабатывать последовательность срабатывания в термовакууме. На уровне управления ограничивают максимальные скорости и моменты колёс, уменьшают число ненужных переключений и вводят мониторинг тока и вибраций, чтобы вовремя заметить рост сопротивления.

Деградация механических приводов носит накопительный характер. В сочетании с радиационными отказами электроники, падением ёмкости батареи и снижением мощности панелей она постепенно сужает возможности аппарата. Даже если ни один узел не отказал полностью, рост вибраций маховиков, увеличение момента сопротивления или снижение надёжности оставшихся одноразовых механизмов делают работу менее эффективной и более рискованной. Поэтому при проектировании кубсата ресурс приводов закладывают с запасом, стратегии управления строят так, чтобы не расходовать его понапрасну, а телеметрию предусматривают достаточной для раннего обнаружения признаков износа.

Конец жизни (End-of-Life) и требования по космическому мусору

По завершении миссии кубсат обязан освободить орбиту в установленные сроки, чтобы не становиться источником космического мусора. Ключевым международным стандартом является **ISO 24113** (Space systems – Space debris mitigation requirements). Он требует, среди прочего:

- ограничения времени пребывания в защищённых областях орбиты после окончания миссии (для LEO – как правило, не более 25 лет, в ряде юрисдикций уже вводятся более жёсткие требования – 5 лет);
- предотвращения преднамеренного разрушения и минимизации вероятности взрывных разрушений;
- контроля риска столкновений и вреда при входе в атмосферу.

Пассивный аэродинамический тормоз.

Наиболее распространённый и надёжный способ для кубсатов на LEO – увеличение площади поперечного сечения за счёт развёртываемых парусов (drag sails), мембран, надувных структур или просто ориентации аппарата максимальной площадью к набегающему потоку. Устройства типа Exo-Brake, ARTICA, AEOLDOS и аналогичные успешно продемонстрированы в полёте и позволяют сократить время существования с десятков лет до месяцев или даже недель. Пассивные системы не требуют топлива и работоспособной ADCS после развёртывания, что делает их предпочтительными.

Активный двигательный манёвр.

При наличии остатков топлива или специальной двигательной установки аппарат может выполнить манёвр снижения перигея. Это более быстрый и предсказуемый способ, но он зависит от исправности двигателя, системы ориентации и наличия достаточного запаса Δv в конце миссии. Риск отказа двигательной установки делает чисто активные стратегии менее предпочтительными для одноразовых кубсатов.

Часто используют комбинированный подход: активный манёвр для быстрого снижения высоты + пассивный парус для гарантированного завершения схода.

Таким образом, «эволюция и адаптация» кубсата охватывает весь его жизненный цикл – от борьбы с ранними отказами через управление постепенной деградацией до ответственного завершения существования. Только системный подход к надёжности, мониторингу состояния и планированию End-of-Life позволяет превратить кубсат из короткоживущего эксперимента в полноценный элемент современной космической инфраструктуры.

Заключение

Обзор «Анатомия и физиология кубсатов» представляет кубсат не как набор отдельных технических подсистем, а как целостный инженерный организм, в котором конструкция, энергетика, терморегуляция, вычисления, ориентация, связь и взаимодействие со средой образуют единую взаимосвязанную систему. Подобно тому, как в биологии понимание физиологии невозможно без знания анатомии, так и успешное проектирование, эксплуатация и завершение миссии кубсата требуют системного взгляда на все уровни его организации – от несущего «скелета» до стратегий «конца жизни».

В Части I была рассмотрена конструктивная основа аппарата. Стандартизированный форм-фактор (CDS), выбор материалов, внутренняя компоновка, физические магистрали и интерфейсы определяют не только механическую прочность и технологичность сборки, но и возможности размещения полезной нагрузки, тепловые пути, электромагнитную совместимость и массово-инерционные характеристики. Именно здесь закладываются фундаментальные ограничения, которые впоследствии приходится учитывать всем остальным подсистемам.

Часть II раскрыла «физиологию» кубсата – процессы генерации и распределения энергии, поддержания теплового гомеостаза, обработки данных, управления ориентацией и обмена информацией с внешним миром. Энергетический метаболизм (EPS) оказывается центральным звеном: от эффективности солнечных панелей, состояния аккумуляторов и архитектуры шин питания напрямую зависят возможности ADCS, объём передаваемых данных и длительность активной работы. Терморегуляция (TCS) обеспечивает выживание электроники и батарей в условиях экстремальных орбитальных циклов. Бортовой компьютер и программное обеспечение реализуют автономию и отказоустойчивость (FDIR), а система ориентации и двигательная установка превращают аппарат из пассивного объекта в активно управляемый. Наконец, радиолиния определяет информационную отдачу миссии и остаётся одним из главных потребителей ресурсов.

Часть III показала, что кубсат существует в агрессивной среде, которая непрерывно воздействует на него как «патогенный» фактор. Радиация (TID и одиночные эффекты), атомарный кислород, вакуумное дегазация и многократные циклы смены температуры вызывают постепенную деградацию материалов и электроники. Надёжность достигается не столько использованием полностью радиационно-стойких компонентов (что часто невозможно по массе, объёму и стоимости), сколько системными решениями: резервированием, кодами коррекции ошибок, FDIR-алгоритмами, тщательным отбором и тестированием COTS. Жизненный цикл аппарата неизбежно включает фазу деградации и требует заблаговременного планирования завершения миссии в соответствии с требованиями по снижению космического мусора (ISO 24113 и национальные нормы, всё чаще устанавливающие пятилетний срок увода с LEO).

Приложение, посвящённое стандартам, подчёркивает, что кубсаты развивались в особом нормативном пространстве. CubeSat Design Specification, серия стандартов ISO (17770, 19683, 17981, 24113), адаптированные требования GEVS и ECSS, а также ICD конкретных

деплойеров образуют многоуровневую систему, которая обеспечивает безопасность запуска и совместимость при сохранении главного преимущества платформы – относительно низкой стоимости и коротких сроков разработки.

Главный вывод обзора состоит в следующем. Успешный кубсат – это результат не максимизации характеристик отдельных подсистем, а их согласованной оптимизации в условиях жёстких ограничений по массе, объёму, энергии и стоимости. Каждый процент эффективности солнечных элементов, каждый градус стабильности температуры батареи, каждый децибел запаса радиолинии и каждый успешно обработанный одиночный сбой вносят вклад в итоговую результативность миссии. При этом растущие требования к ответственному завершению полёта делают проектирование End-of-Life неотъемлемой частью системной инженерии с самых ранних этапов.

Кубсаты уже прошли путь от студенческих демонстраторов до полноценных инструментов дистанционного зондирования, научных исследований, технологий и коммерческих сервисов. Дальнейшее развитие будет определяться совершенствованием элементной базы, повышением степени интеграции и автономии, а также способностью сообщества сохранять баланс между инновациями и надёжностью, между скоростью разработки и ответственностью за космическую среду. Понимание «анатомии и физиологии» этих аппаратов остаётся необходимой основой для тех, кто проектирует, строит и эксплуатирует следующее поколение малых спутников.

Приложение А. Стандарты сертификации кубсатов

Сертификация и квалификация кубсатов представляют собой систему требований, обеспечивающих безопасность запуска, совместимость с деплойерами и ракетами-носителями, а также минимизацию рисков для основных полезных нагрузок и космической среды.

1. CubeSat Design Specification (CDS) – базовый стандарт форм-фактора

Разработчик: California Polytechnic State University (Cal Poly).

Актуальная версия: Rev. 14.1.

CDS является де-факто мировым стандартом геометрических, механических и базовых безопасных требований. Основные положения:

- Форм-фактор 1U = 100 × 100 × 113,5 мм; кратные размеры 2U, 3U, 6U, 12U.
- Направляющие (rails), твёрдое анодирование контактирующих поверхностей.
- Deployment switches, RBF-пин, запрет питания во время интеграции.
- Минимум три inhibit для пропульсивных систем.
- Outgassing: TML < 1 %, CVCM < 0,1 %.
- Рекомендация по суммарной химической энергии ≤ 100 Вт·ч.

2. Международные стандарты ISO

- ISO 17770:2017 – Cube satellites (CubeSats): формализация требований CDS.
- ISO 19683 – Design qualification and acceptance tests of small spacecraft and units: минимальные требования к испытаниям малых аппаратов.
- ISO 17981:2024 – CubeSat interface: внутренние интерфейсы и требования к datasheet.
- ISO 24113 – Space debris mitigation requirements: ограничение времени пребывания на орбите, предотвращение разрушений, контроль риска при входе в атмосферу.

3. Стандарты испытаний

- NASA GSFC-STD-7000 (GEVS) – основной ориентир по уровням вибрации, удара, термоциклирования, TVAC. Для кубсатов обычно tailoring’уется.
- ECSS-E-ST-10-03 – европейский стандарт испытаний, часто адаптируемый.
- SMC-S-016 / MIL-STD-1540 – справочные военные стандарты.

4. Требования деплойеров и операторов запуска

Каждый деплойер (P-POD, CSD, NLAS, ISIS QuadPack, NanoRacks NRCSD, Exolaunch, JAXA и др.) имеет собственный ICD/IDD, уточняющий допуски, массу, центр масс, положение switches и требования к испытаниям.

5. Требования по космическому мусору

Помимо ISO 24113: NASA NPR 8715.6, FCC (5-летнее правило для LEO), ESA Space Debris Mitigation Requirements и Zero Debris Charter, национальные лицензионные режимы.

6. Практическая схема сертификации

1. Проектирование по CDS / ISO 17770.
2. Материалы с подтверждённым outgassing.
3. FMEA/FMECA и радиационный анализ.
4. Квалификационные испытания engineering model.
5. Приёмочные испытания flight model.
6. Интеграция в деплойер и финальные испытания.
7. Пакет документации по debris mitigation и safety.
8. Лицензии (частотный спектр, запуск, операции).

«Сертификация» кубсата – это совокупность соответствия CDS/ISO, успешных экологических испытаний, требований деплойера/оператора запуска и норм по космическому мусору.

Приложение Б. Англо-русский глоссарий ключевых терминов

В таблице собраны основные английские термины и устойчивые выражения, использованные в обзоре. Для каждого приведён смысловой русскоязычный эквивалент (с учётом значения в контексте кубсатов) и развёрнутое пояснение роли понятия.

CubeSat Design Specification (CDS) – Спецификация конструкции кубсата (стандарт Cal Poly)
Базовый документ, определяющий геометрию, механические интерфейсы, требования к материалам, рельсам, выключателям отделения и базовой безопасности. Обеспечивает совместимость аппарата с большинством современных деплойеров и задаёт «скелет» стандартизированной платформы.

Primary structure – Несущая (силовая) конструкция
Основной каркас кубсата, воспринимающий нагрузки выведения, отделения и орбитальной эксплуатации. Выполняет роль скелета, защищает полезную нагрузку и обеспечивает интерфейс с деплойером.

Secondary structure – Вторичная конструкция
Элементы, не входящие в силовую схему (кронштейны, держатели плат, внутренние панели). Служат для крепления приборов и организации внутреннего пространства.

Deployer / POD (Picosatellite Orbital Deployer) – Деплойер / контейнер выведения
Стандартизированный контейнер, из которого кубсат отделяется на орбите. Задаёт жёсткие ограничения на габариты, массу, положение центра масс и последовательность включения систем.

Rails – Направляющие (рельсы)
Продольные контактные поверхности каркаса, по которым аппарат скользит внутри деплойера. Требуют твёрдого анодирования и строго нормированной геометрии.

Hard anodizing – Твёрдое анодирование
Упрочняющее оксидное покрытие алюминиевых рельсов. Предотвращает холодную сварку в вакууме, снижает износ и обеспечивает электрическую изоляцию.

Center of Mass (CoM) / Center of Gravity (CoG) – Центр масс
Точка приложения массы аппарата. Её положение строго ограничено стандартом, поскольку напрямую влияет на динамику отделения и работу системы ориентации.

Moment of Inertia – Момент инерции
Характеристика распределения масс, определяющая угловое ускорение аппарата под действием управляющих моментов. Важна для расчёта ADCS.

Outgassing – дегазация (газовыделение)
Выделение летучих веществ из материалов в вакууме. Контролируется по критериям TML и CVCM; избыточное газовыделение загрязняет оптику и покрытия.

TML (Total Mass Loss) – Суммарная потеря массы
Показатель газовыделения: допустимая потеря массы материала в вакууме (обычно ≤ 1 %).

CVCM (Collected Volatile Condensable Material) – Собранные летучие конденсируемые вещества
Доля веществ, способных конденсироваться на холодных поверхностях (обычно ≤ 0,1 %). Критичный параметр для защиты оптики.

Bake-out – Термовакуумный прогрев
Процедура удаления летучих веществ из аппарата или узлов путём нагрева в вакууме перед полётом.

Electrical Power System (EPS) – Система электропитания
«Энергетический метаболизм» кубсата: генерация, накопление, преобразование и распределение электроэнергии.

MPPT (Maximum Power Point Tracking) – Слежение за точкой максимальной мощности
Алгоритм и устройство, обеспечивающие максимальный съём энергии с солнечных панелей при изменяющихся освещённости и температуре.

BMS (Battery Management System) – Система управления батареей
Контроль напряжения, тока, температуры и состояния заряда аккумуляторов, балансировка ячеек и защита от опасных режимов.

Li-ion / $LiFePO_4$ (LFP) – Литий-ионные / литий-железо-фосфатные аккумуляторы
Основные типы накопителей энергии на кубсатах. LFP лучше переносит большое число мелких циклов, типичных для низкой орбиты.

Bus (power bus) – Шина питания
Линия распределения электроэнергии (нерегулируемая от батареи или стабилизированные 3,3 В, 5 В, 12 В).

eFuse – Электронный предохранитель
Быстродействующая полупроводниковая защита, отключающая отказавшую нагрузку без разрушения цепи.

Thermal Control System (TCS) – Система терморегулирования
Комплекс средств поддержания температур компонентов в допустимых пределах (пассивных и активных).

α/ε (alpha/epsilon) – Отношение коэффициента поглощения к коэффициенту излучения
Ключевой параметр оптических покрытий, определяющий нагрев поверхности на Солнце и эффективность излучения тепла в космос.

MLI (Multi-Layer Insulation) – Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ)
Многослойная изоляция из низкоэмиссионных плёнок, резко снижающая лучистый теплообмен. На кубсатах применяется ограниченно из-за объёма.

Thermal strap / Thermal link – Тепловой мост
Гибкий или жёсткий теплопроводящий элемент (медь, алюминий, графит), передающий тепло от источника к радиатору.

TIM (Thermal Interface Material) – Термоинтерфейсный материал
Пасты, прокладки и фольги, заполняющие микронеровности и снижающие контактное тепловое сопротивление.

Heat pipe – Тепловая трубка
Устройство, переносящее тепло за счёт фазового перехода рабочей жидкости при очень малом температурном градиенте.

Kapton heater – Тонкоплёночный нагреватель на полиимиде
Основной активный элемент подогрева батареи и чувствительных приборов.

PCM (Phase Change Material) – Фазопереходный материал
Вещество, стабилизирующее температуру за счёт поглощения/выделения скрытой теплоты при плавлении/кристаллизации.

OBC / OBDH (On-Board Computer / On-Board Data Handling) – Бортовой компьютер / система обработки данных
«Нервная система» и вычислительное ядро аппарата, отвечающее за управление, телеметрию и выполнение алгоритмов.

RTOS (Real-Time Operating System) – Операционная система реального времени
ОС с детерминированным временем отклика, необходимая для критичных задач управления.

FPGA fabric – Программируемая логическая ткань ПЛИС
Массив конфигурируемых логических блоков, используемый для реализации высоконадёжных и параллельных функций.

CSP (CubeSat Space Protocol) – Протокол космической связи кубсатов
Лёгковесный сетевой протокол для обмена данными внутри аппарата и с наземной станцией.

FDIR (Fault Detection, Isolation and Recovery) – Обнаружение, изоляция и восстановление после отказов
Комплекс программно-аппаратных средств повышения живучести.

Safe Mode – Безопасный режим
Минимальная конфигурация систем, обеспечивающая выживание аппарата и возможность восстановления связи при серьёзных аномалиях.

Watchdog – Сторожевой таймер
Устройство, перезапускающее процессор при зависании программы.

ADCS (Attitude Determination and Control System) – Система определения и управления ориентацией

«Моторика и пространственные рефлексы» кубсата: датчики, актюаторы и алгоритмы ориентации.

Magnetometer – Магнитометр
Датчик вектора геомагнитного поля; работает на всей орбите, включая тень.

Sun sensor – Солнечный датчик
Определяет направление на Солнце; бесполезен в тени.

Star tracker – Астродатчик (стар-трекер)
Наиболее точный датчик абсолютной ориентации по звёздам.

Earth horizon sensor – Датчик горизонта Земли
Инфракрасный датчик края земного диска; полезен для надирной ориентации и работы в тени.

Magnetorquer – Магнитная катушка
Актюатор, создающий момент за счёт взаимодействия с магнитным полем Земли. Не имеет расходников.

Reaction wheel – Двигатель-маховик (реакционное колесо)
Актюатор точного трёхосного управления; требует периодической разгрузки.

CMG (Control Moment Gyro) – Управляющий моментный гиродин
Актюатор, создающий большой момент за счёт поворота оси быстро вращающегося ротора; на кубсатах применяется редко.

B-dot – Алгоритм B-dot
Простой и робастный закон гашения начальной угловой скорости с использованием только магнитометра.

TRIAD / QUEST – Геометрические методы определения ориентации
Алгоритмы вычисления ориентации по двум или более векторным измерениям.

MEKF (Multiplicative Extended Kalman Filter) – Мультипликативный расширенный фильтр Калмана
Основной алгоритм оценки ориентации и дрейфа гироскопов на кубсатах.

Detumbling – Гашение закрутки
Процесс снижения начальной угловой скорости после отделения от деплойера.

Momentum dumping – Разгрузка кинетического момента
Сброс накопленного момента реакционных колёс с помощью магнитных катушек или двигателей.

Cold gas thruster – Двигатель на холодном газе
Простая двигательная установка с низким удельным импульсом; используется для ориентации и небольших манёвров.

Electrospray / FEEP – Электроспрейный / полевой эмиссионный двигатель
Электростатический микродвигатель с высоким удельным импульсом и микроньютонной тягой.

PPT (Pulsed Plasma Thruster) – Импульсный плазменный двигатель
Электроракетный двигатель с твёрдым или жидким рабочим телом и импульсной тягой.

Hall thruster – Двигатель Холла
Электроракетный двигатель со средним удельным импульсом и тягой в миллиньютоны; применяется в основном на 6U и крупнее.

Link Budget – Бюджет радиолинии
Расчёт всех усилений и потерь сигнала на пути от передатчика до входа приёмника; основа проектирования системы связи.

EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) – Эквивалентная изотропно излучаемая мощность
Произведение мощности передатчика на усиление передающей антенны; характеризует «яркость» сигнала аппарата.

G/T – Добротность наземной станции
Отношение усиления приёмной антенны к шумовой температуре системы; определяет чувствительность приёма.

BPSK / QPSK / OQPSK / APSK – Виды фазовой манипуляции
Основные виды цифровой модуляции, применяемые на кубсатах (от наиболее робастной до высокоскоростной).

FEC (Forward Error Correction) – Помехоустойчивое кодирование
Методы исправления ошибок без повторной передачи (Reed-Solomon, свёрточные, Turbo, LDPC).

LDPC (Low-Density Parity-Check) – Код с малой плотностью проверок на чётность
Современный высокоэффективный код, близкий к пределу Шеннона; основа стандарта DVB-S2.

DVB-S2 / ACM – Стандарт цифрового спутникового вещания с адаптивной модуляцией и кодированием
Применяется в высокоскоростных линиях кубсатов для максимизации объёма данных за пролёт.

Patch antenna – Патч-антенна (микрополосковая)
Плоская лёгкая антенна, широко используемая в S- и X-диапазонах; не требует развёртывания.

Helical / Quadrifilar antenna – Спиральная / квадрифилярная антенна
Антенны с круговой поляризацией и умеренным усилением; часто разворачиваемые.

Reflectarray – Отражательная решётка
Плоская антенна с высоким усилением, способная совмещаться с солнечной панелью.

TID (Total Ionizing Dose) – Накопленная ионизирующая доза
Интегральный эффект радиации, приводящий к постепенной деградации параметров электроники.

SEE (Single Event Effects) – Одиночные радиационные эффекты
Мгновенные эффекты от одной высокоэнергетической частицы.

SEU (Single Event Upset) – Одиночный сбой
Переключение состояния ячейки памяти или триггера (bit flip).

SEL (Single Event Latch-up) – Одиночное тиристорное защёлкивание
Паразитная структура в КМОП, вызывающая резкий рост тока; требует быстрого отключения питания.

SEFI (Single Event Functional Interrupt) – Одиночный функциональный отказ
Зависание или потеря конфигурации без обязательного разрушения кристалла.

RHBD (Radiation Hardening by Design) – Радиационная стойкость на уровне проектирования
Схемотехнические и архитектурные методы повышения живучести без использования специальных rad-hard компонентов.

TMR (Triple Modular Redundancy) – Тройное модульное резервирование
Три параллельных канала с голосованием; основной способ защиты от SEU.

ECC / EDAC – Коды коррекции ошибок / обнаружения и исправления ошибок
Защита памяти от одиночных и двойных сбоев.

Scrubbing – Скраббинг (очистка)
Периодическое обновление содержимого памяти или конфигурации FPGA для устранения накопившихся SEU.

Atomic Oxygen (AO) – Атомарный кислород
Активный компонент верхней атмосферы, вызывающий химическую эрозию полимеров на низких и сверхнизких орбитах.

COTS (Commercial Off-The-Shelf) – Коммерческие компоненты широкого применения
Готовые промышленные или потребительские электронные компоненты, широко используемые в кубсатах вместо дорогих радиационно-стойких.

FMEA / FMECA – Анализ видов и последствий отказов / с учётом критичности
Системный метод выявления потенциальных отказов, их последствий и порядок приоритетных мер по повышению надёжности.

Infant mortality – «Младенческая смертность»
Повышенная частота отказов в первые недели–месяцы полёта, характерная для кубсатов.

End-of-Life (EOL) – Окончание срока активного существования
Фаза завершения миссии, включающая увод с орбиты и выполнение требований по космическому мусору.

Drag sail – Аэродинамический тормозной парус
Разворачиваемое устройство, увеличивающее сопротивление атмосферы и ускоряющее сход с орбиты.

ISO 24113 – Международный стандарт по снижению космического мусора
Устанавливает требования к ограничению времени пребывания на орбите, предотвращению разрушений и безопасности входа в атмосферу.

GEVS (General Environmental Verification Standard) – Общий стандарт проверки окружающей среды (NASA)
Базовый документ по уровням и методам вибрационных, ударных, термических и термовакуумных испытаний.

TVAC (Thermal Vacuum Test) – Термовакуумные испытания
Комплексные испытания аппарата в вакууме с имитацией солнечного потока и холодного космоса.

RBF (Remove Before Flight) – Штырь (пин) «удалить перед полётом»
Механический ингибитор, предотвращающий случайное включение систем на Земле.

Inhibit switch – Выключатель-ингибитор (deployment switch)
Микровыключатель, удерживающий системы обесточенными до полного выхода из деплойера.