

Применение источников питания в бортовой системе летательных аппаратов:

архитектура, требования и особенности

В статье рассмотрены ключевые аспекты архитектуры, требования к надежности и современные тенденции в разработке источников питания для авиационной техники, включая анализ практических кейсов и нормативных стандартов.

Тигран Гайказьян

gt@ptkgroup.ru

Введение

Бортовые системы электроснабжения летательных аппаратов (ЛА) являются критически важным элементом, обеспечивающим функционирование всех систем — от двигателей до сложной авионики. Современные ЛА, будь то пассажирские самолеты, военные истребители или беспилотные аппараты, зависят от стабильного и надежного питания, что подчеркивает актуальность темы. В условиях экстремальных нагрузок (вибраций, перепадов температур, электромагнитных помех) источники питания должны не только соответствовать строгим стандартам, но и обеспечивать резервирование, компактность и высокую эффективность.

Структура бортовых систем электроснабжения включает первичные источники (генераторы, аккумуляторы), преобразователи напряжения и распределительные сети, работающие в диапазоне от 28 В постоянного тока до 115 В/400 Гц переменного тока. При этом архитектура таких систем постоянно эволюционирует: внедряются модульные решения и цифровые интерфейсы для мониторинга параметров в реальном времени.

Однако проектирование источников питания для ЛА сопряжено с рядом сложностей: необходимость защиты от электромагнитных воздействий, адаптация к различным типам бортовых сетей, а также соблюдение требований функциональной безопасности, особенно в условиях растущей автоматизации.

Архитектура бортовых систем питания: российские решения

Архитектура бортовых систем электроснабжения ЛА в России формируется под влиянием уникальных требований: экстремальных условий эксплуатации, необходимости импортозамещения и перехода на цифровые технологии управления. В основе таких систем лежат первичные источники энергии — син-

хронные генераторы переменного тока и коллекторные генераторы постоянного тока, которые обеспечивают питание шин 28 В, 270 В и 115 В/400 Гц.

Далее рассмотрим примеры реализации, включая интеграцию преобразователей постоянного тока в системы электропитания ЛА и энергоэффективные решения для космических аппаратов. В проектах импортозамещения активно внедряется экосистема источников питания постоянного тока SmartPower серий DD7A и DD7C, а также соответствующие фильтры электромагнитных помех DF7A, совместимые с западными аналогами и адаптированные к российским стандартам.

Первичные источники энергии

Генераторы: в гражданских самолетах устанавливаются генераторы переменного тока с выходным напряжением 115 В/400 Гц и мощностью 90 кВт. Они интегрированы с системой управления FADEC (Full Authority Digital Engine Control), которая регулирует частоту вращения ротора для стабилизации выходного напряжения.

Аккумуляторы: используются литий-ионные батареи с системой балансировки ячеек. Балансировка осуществляется через ШИМ-контроллеры, которые выравнивают заряд на каждом элементе с точностью $\pm 1\%$. Никель-кадмиевые аккумуляторы используются для резервного питания в военных ЛА. Их преимущество — стабильность при низких температурах.

Распределительные системы

Шины постоянного тока: шина питания 270 В используется для систем управления двигателями и высокомоментными системами (например, для военных ЛА). Высоковольтные шины снижают токи в цепях, уменьшая потери на сопротивлении проводов.

Для данных шин компания SmartPower разработала преобразователь DD7A252-300N12-M-HB (рис. 1) с диапазоном входного напряжения 180-375 В в ком-



Рис. 1. Источник питания постоянного тока DD7A252-300N12-M-HB



Рис. 2. Источник питания постоянного тока DD7A152-24N36-M-QB

пактном корпусе Half-Brick (57,9×55,9×12,7 мм) и следующими основными параметрами:

- мощность: до 250 Вт;
- эффективность: до 92%;
- возможность параллельной работы;
- диапазон рабочих температур:
 - Т-класс: -40...+100 °С,
 - М-класс: -55...+100 °С;
- вес: 98 г;
- полный набор стандартных выходных напряжений: 3,3–48 В.

Шина питания 28 В используется для авионики и систем управления. Низковольтные шины обеспечивают безопасность при обслуживании.

Для использования на низковольтной шине питания компания SmartPower предлагает преобразователь в компактном корпусе Quarter-Brick (57,9×36,8×12,7 мм) DD7A152-24N36-M-QB (рис. 2) с диапазоном входного напряжения 18–40 В и мощностью до 150 Вт:

- эффективность: до 92%;

- возможность параллельной работы;
- диапазон рабочих температур:
 - Т-класс: -40...+100 °С,
 - М-класс: -55...+100 °С;
- вес: 62 г;
- полный набор стандартных выходных напряжений: 3,3–48 В.

DC/DC-преобразователи серии DD7A (рис. 3) на основе карбид-кремниевых (SiC) транзисторов обеспечивают высокую эффективность до 94% за счет снижения тепловых потерь и повышения общей надежности системы. SiC-транзисторы отличаются минимальными потерями на переключение, что особенно важно для высокочастотных преобразователей, требующих стабильной работы.

Запатентованная топология управления PFM (pulse frequency modulation) совместно с металлической подложкой и силиконовым термокомпаньондом в пластиковом корпусе оптимизирует теплообмен, повышая эффективность и долговечность модулей DD7A.

Экосистема преобразователей SmartPower включает модули питания, фильтры электромагнитных помех и радиационно-стойкие источники, формируя комплексную систему электропитания. Продукты полностью совместимы с аналогами Vicor серий V24 и V300, что позволяет использовать их в схожих применениях.

Серия DD7A демонстрирует эффективность преобразования на 5–7% выше, чем аналоги Vicor, благодаря улучшенной конструкции и защите от перенапряжений, перегрузок, коротких замыканий и перегрева. Производство соответствует стандарту SJ20668-1998 (эквивалент MIL-PRF-38534L), что гарантирует надежность для авиационных систем.

Основные характеристики источников питания SmartPower серии DD7A:

- максимальная мощность DC/DC-преобразователей: до 600 Вт;
- диапазон входных напряжений: 2:1 или 4:1;
- эффективность до 96%;

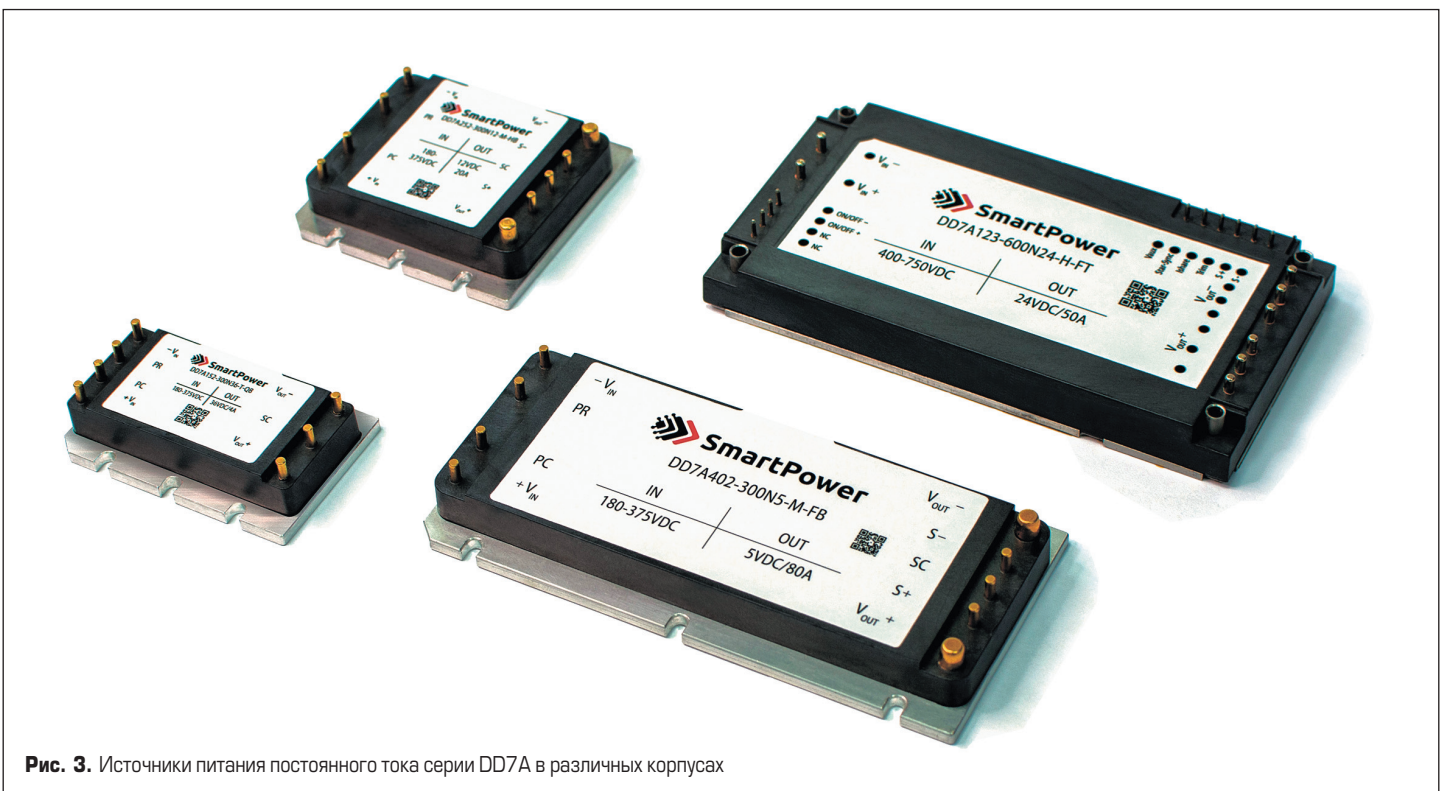


Рис. 3. Источники питания постоянного тока серии DD7A в различных корпусах

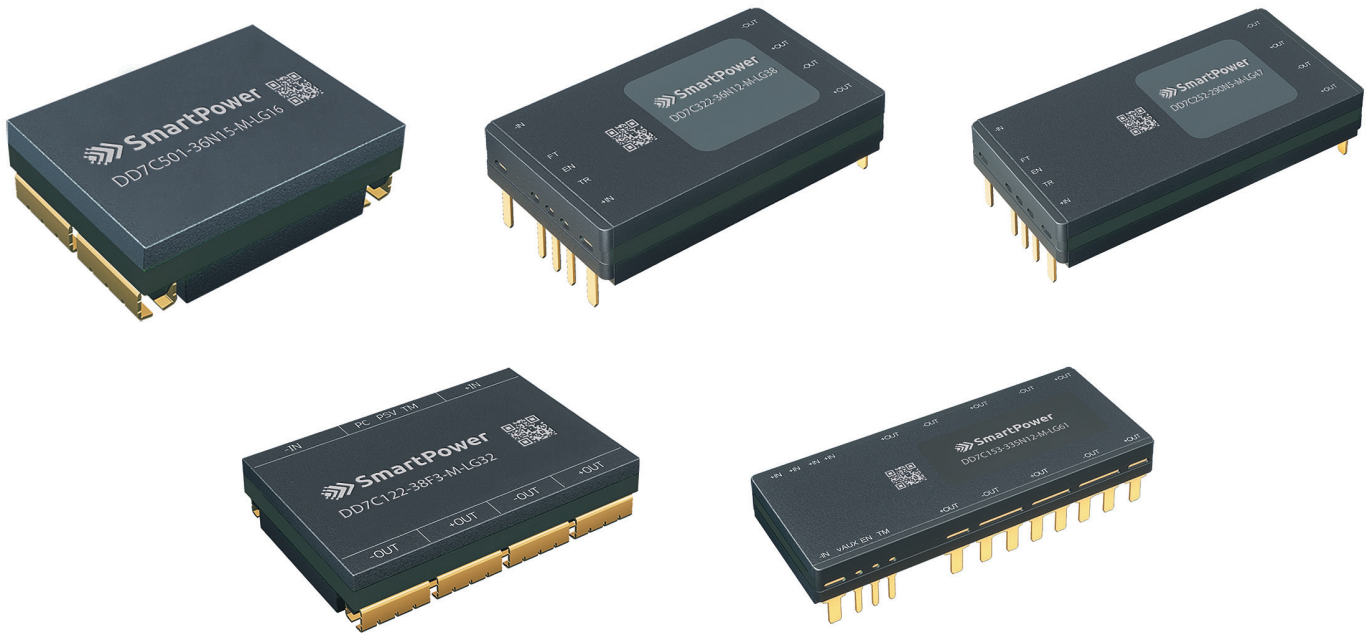


Рис. 4. Модульные ЧИП преобразователи серии DD7C

- температурный диапазон: $-55...+100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- использование керамических конденсаторов для повышения надежности;
- возможность параллельной работы преобразователей;
- стандартные выходные напряжения: 3,3–48 В.

Модульные ЧИП преобразователи от компании SmartPower

Преобразователи постоянного тока серии DD7C (рис. 4) представляют собой новое поколение модульных источников питания, основанных на технологии ЧИП (преобразователь в корпусе), и имеют ряд преимуществ перед модулями Brick-формата.

Программное переключение в мегагерцовом диапазоне, запатентованная логика управления и технология компоновки со высокой эффективностью (до 97,5%) позволяют модулям серии DD7C достичь высокую удельную мощность (до 2735 Вт/дюйм³ или 167 Вт/см³) в ультратонком корпусе (до 6,73 мм). По сравнению с традиционными модулями питания удельная мощность увеличена в 10 раз, а вес снижен на 10%.

Серия DD7C также имеет защиту от входного перенапряжения, выходного перенапряжения, перегрузки по току, защиту от короткого замыкания и перегрева, управление включением, индикацию неисправностей, контроль температуры и другие функции.

Продукция проходит многократные проверки, что гарантирует надежность в работе и подходит для применения в авиации, космических аппаратах, БПЛА, центров обработки данных, где предъявляются чрезвычайно строгие требования по мощности, эффективности, весу и габаритам.

Конструкция и производство изделий соответствуют требованиям SJ20668-1998 «Общие

технические условия для микросхем» (соответствует MIL-PRF-38534L).

Основные характеристики источников питания SmartPower серии DD7C:

- максимальная мощность: до 1680 Вт;
- диапазоны входных напряжений: от 9–50 В до 200–420 В;
- тестирование в соответствии со стандартом GJB150A-2009 (аналог MIL-STD-810G);
- эффективность: до 94%;
- температурный диапазон: $-55...+100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- конструктивное соответствие третьему поколению источников питания Vicor;
- выходные напряжения: 3,3–48 В.

Параллельное подключение до восьми модулей ЧИП серии DD7C в авиационных системах позволяет обеспечить резервирование и повысить общую надежность системы питания, увеличивая мощность и минимизируя риски отказов. Каждый преобразователь контролирует состояние соседних и берет на себя нагрузку при их отключении.

Требования к источникам питания в российской авиации

Теоретические основы проектирования источников питания для авиационной техники формируются под влиянием строгих требований безопасности, экстремальных условий эксплуатации и нормативной базы. В российской авиации эти требования устанавливаются федеральными авиационными правилами и международными стандартами, такими как ГОСТ Р 54073-2017, регламентирующими параметры электробезопасности и электромагнитной совместимости.

Ключевыми факторами являются:

- Надежность в экстремальных условиях: модули питания должны сохранять работоспособность при температурах $-60...+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, вибрациях до 9g и воздействии радиации.

- Сертификация и соответствие: системы питания обязаны проходить сертификацию в рамках государственного регулирования, включая требования к резервированию и защите от помех.
- Адаптация к санкционным ограничениям: акцент делается на импортозамещении компонентов и использовании отечественных разработок, таких как радиационно стойкие микросхемы.

Теория проектирования преобразователей включает анализ переходных процессов, тепловых режимов и алгоритмов управления, что отражено в работах по динамике полета и авионавигации. Этот раздел раскрывает взаимосвязь нормативных требований, физических ограничений и инновационных решений в контексте российской авиапромышленности.

Экстремальные условия эксплуатации

Российские ЛА эксплуатируются в диапазоне от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (например, в условиях Заполярья) до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Средняя Азия). Компоненты источников питания должны сохранять работоспособность при таких перепадах. Например, в гражданских самолетах используются термостойкие конденсаторы с полимерными диэлектриками, выдерживающие циклы замораживания-размораживания без потери емкости.

Вибрации и удары: военные ЛА испытывают перегрузки до 9g при маневрах. Для защиты преобразователей применяются:

- Герметичные корпуса с вибропоглощающими прокладками из полиуретана.
- Фиксация элементов эпоксидными компаундами, которые демпфируют колебания до 500 Гц.

Вторичные источники электропитания SmartPower проходят тестирование согласно стандарту GJB150A-2009 (аналог MIL-STD-810G) и удовлетворяют требованиям

в том числе по допустимым вибрациям в частотном диапазоне 5–2000 Гц с ускорением 7,5–10g.

Электромагнитная совместимость (ЭМС)

Современные ЛА оснащены радиолокационными станциями (РЛС) и системами радиоэлектронной борьбы (РЭБ), создающими мощные ЭМП. Для подавления помех в источниках питания применяют:

- многослойные экраны из магнитных материалов (пермаллоев) с высокой магнитной проницаемостью;
- LC-фильтры с полосой подавления 10 кГц – 1 ГГц.

В области подавления электромагнитных помех компания Smart Power производит серию фильтров постоянного тока серии DF7A на диапазон входного напряжения 3–30 В с выходным током от 20 А (DF7A602-20N) до 30 А (DF7A902-30N).

Основные технические характеристики фильтра представлены ниже. Стоит отметить компактный корпус Quarter-Brick (57,9×36,8×12,7 мм) и выбор необходимого температурного диапазона работы:

- подавление гармоник: >40 дБ (от 0,1 кГц до 1 МГц);
- эффективность: до 98%;
- диапазон рабочих температур:
 - Т-класс: –40...+100 °С,
 - М-класс: –55...+100 °С;
- пульсации выходного напряжения: не более 10 мВ;
- вес: 216 г;
- регулировка выходного напряжения: 75–110%.

Радиационная стойкость

В космических аппаратах и высотных беспилотниках критически важна защита от ионизирующего излучения. Российские разработчики используют:

- Радиационно стойкие микросхемы с устойчивостью к дозе 100 кРад (например, КМОП-структуры с защитой от лавинного пробоя).
- Системы тройного модульного резервирования для критических узлов, где три идентичных модуля работают параллельно, а результаты обрабатываются по мажоритарной логике.

Для использования в космическом пространстве компанией SmartPower разработана серия гибридных радиационно-стойких источников питания серии DD1A (рис. 5) и фильтров (DF1A), изготовленных по толсто пленочной технологии с герметичным корпусированием в металлическую оболочку.

Продукция компании SmartPower построена на основе современных конструкторских решений и по техническим и эксплуатационным характеристикам не уступает мировым аналогам, соответствует зарубежным стандартам безопасности и электромагнитной совместимости. На производстве внедрена система многоуровневого контроля качества, обеспечивающая высокую надежность готовых изделий, удовлетворяющих стандарту GJB2438A-2002. Продукция компании SmartPower соответствует стандартам для гибридных интегральных схем и электронных компонентов GB2438B-2017, GJB10164-2021, GJB548C-2019.

Основные характеристики радиационно-стойких источников питания SmartPower серии DD1A:

- диапазоны входных напряжений: 20–50, 30–60 и 80–120 В;
- выходная мощность: 1,5–120 Вт;
- до трех выходных каскадов;



Рис. 5. Радиационно стойкие источники питания серии DD1A

- радиационная стойкость: до 100 кРад;
- эффективность: до 82%;
- режим работы: фиксированная частота преобразования;
- соответствие характеристикам высоконадежных и радиационно стойких источников питания компаний VPT и Interpoint (CraneAerospace);
- толсто пленочная технология изготовления и металлическая герметизация.

Для защиты электрических цепей и компонентов от нежелательных помех компания SmartPower в рамках своей экосистемы разработала радиационно стойкие высокоэффективные фильтры электромагнитных помех серии DF1A (рис. 6).

Основные характеристики фильтров электромагнитных помех от компании SmartPower:

- диапазоны входного напряжения: 0–50 и 80–120 В;
- выходной ток: до 10 А;
- диапазон рабочих температур: –55...+125 °С;
- внутреннее сопротивление: 0,07–1,5 Ом;
- уровень шумоподавления:
 - ≥1 дБ (1 кГц) ≥ –1,
 - ≥50 дБ (500 кГц),
 - ≥50 дБ (1 МГц),
 - ≥45 дБ (5 МГц);
- максимальная поглощенная доза: 100 кРад (Si);
- одиночное событие: 75 МэВ·см²/мг.

Заключение

Высоконадежные источники питания — основа безопасности и эффективности летательных аппаратов. Их проектирование требует учета экстремальных условий, внедрения передовых технологий и жестких стандартов. Только комплексный подход, включающий резервирование, диагностику и инновационные материалы, гарантирует выполнение задачи в любых сценариях.

Продукция SmartPower удовлетворяет потребности производителей авиационной техники, работающей в условиях повышенных нагрузок и строгих требований к надежности. Благодаря использованию современных материалов и технологий, продукция SmartPower соответствует международным стандартам качества и способна функционировать в широком диапазоне температур, при вибрациях и воздействии электромагнитных помех.

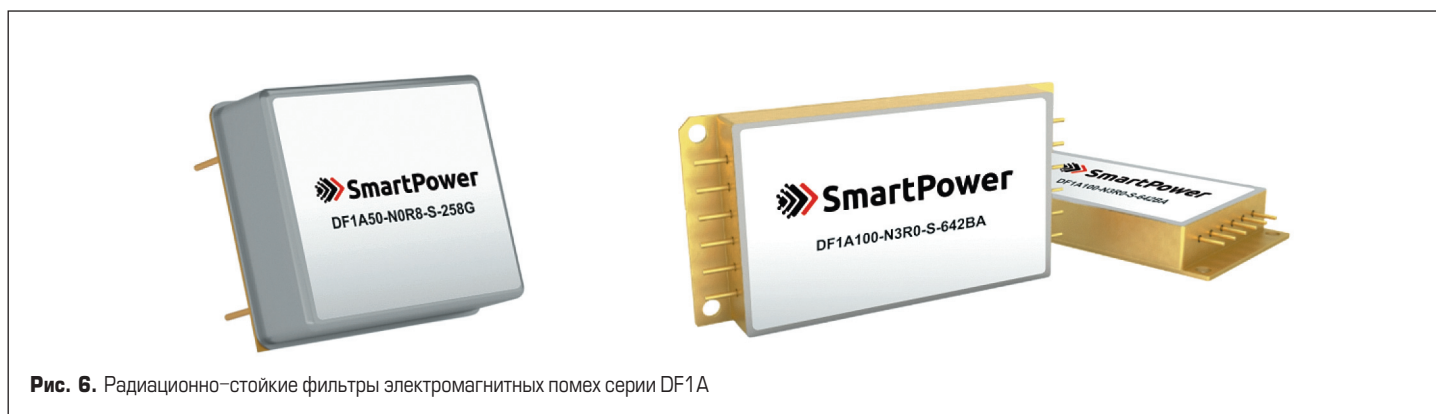


Рис. 6. Радиационно-стойкие фильтры электромагнитных помех серии DF1A