

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПОДАЧИ ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В БОРТОВОЙ АППАРАТУРЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ



Последовательность включения/выключения питающих напряжений, или секвенирование источников питания, можно выполнять разными способами. Однако большинство таких реализаций могут оказаться непригодными для космических аппаратов или спутников. В статье описываются различные методы секвенирования, выполненные на базе нового специализированного секвенсора источников питания ISL70321SEH от компании Intersil.

В современных комплексных системах распределенного питания с большим числом напряжений, необходимых для повышения их производительности и работоспособности питаемых каскадов современной электронной аппаратуры, крайне важно соблюдать заданную последовательность включения/выключения напряжений, а также обеспечить мониторинг состояния и неисправностей в цепях питания, включающий в себя не только контроль уровней напряжения, но и порядок их секвенирования. В главной мере это связано с постоянно растущим использованием специфиче-

ческих и достаточно сложных цифровых устройств. В этой роли выступают:

- заказные интегральные микросхемы (Application-Specific Integrated Circuit, ASIC), предназначенные для решения конкретной, часто узкой прикладной задачи;
- программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС или Field Programmable Gate Array, FPGA), которые могут быть запрограммированы производителем или разработчиком уже после их изготовления;
- цифровой процессор обработки сигналов (ЦПОС) или цифровой сигнальный процессор (Digital Signal Processor, DSP) предназначенный для обработки сигналов, например видеоизображений и сигналов от микроконтроллеров и процессоров, без которых трудно представить современную электронику.

Все перечисленные устройства (и не только они) требуют нескольких источников питающего напряжения. Кроме того, эти устройства, для того чтобы гарантировать их надежную работу и эффективное выполнение своих функций, обычно требуют весьма специфического порядка включения (причем с мониторингом уровней) и отключения питающих напряжений. Проблема заключается еще и в том, что это касается не только очередности включения/выключения, но и соблюдения определенных временных интервалов внутри этого процесса. Добавьте сюда еще и сложность разработки самой аппаратуры, предназначенной для функционирования в условиях космических полетов, и разработчикам системы остается не так уж много вариантов, чтобы реализовать все требования, предъявляемые к питанию такой аппаратуры.

Последовательность включения/выключения питающих напряжений, или, как это часто называют, секвенирование (для этого используется аппаратное средство или решение схемотехнического уровня для задания последовательностей), и мониторинг всех источников питания (ИП) мож-



но выполнить разными способами. Однако большинство таких привычных для аппаратуры широкого коммерческого применения реализаций может оказаться непригодным для космических аппаратов, работающих в суровых условиях глубокого космоса, или для спутников, находящихся на околоземной орбите. В предлагаемой статье описываются различные методы секвенирования, доступные разработчикам общей энергосистемы космических аппаратов и выполненные на базе нового четырехканального радиационно-стойкого специализированного секвенсора ИГ ISL70321SEH, предлагаемого компанией Intersil, который может быть легко каскадирован для организации заданной последовательности включения неограниченного числа отдельных ИП. Также рассматриваются возможности предлагаемого устройства в части мониторинга неисправностей и отказов, что необходимо для повышения работоспособности и производительности систем для космических применений. Кроме того, должно внимание уделено тому, как накопление полной поглощенной дозы (Total Ionizing Dose, TID) и одиночные импульсы излучения (Single Event Effect, SEE — одиночный случайный эффект, вызываемый пролетом частиц с высокой энергией), которым подвергается электронная аппаратура во время космического полета, могут повредить рассматриваемую интегральную микросхему.

Способы секвенирования источников питания

Метод А

Наиболее простым способом реализации последовательности является использование выходов мониторинга уровня напряжения с установкой флага Power Good (PG), который утверждается только тогда, когда напряжение питания находится в норме (иногда с дополнительной фиксированной или программируемой задержкой), и входов разрешения включения Enable (EN), которые, как правило, присутствуют в блоках питания, используемых для организации распределенной системы питания, так называемой «point-of-load», или, сокращенно, POL (в этой технологии ИП максимально приближены к своим нагрузкам, а сами запрашиваются от одной общей шины), и в некоторых линейных стабилизаторах с малым собственным падением напряжения на регулирующем транзисторе, так называемых LDO-стабилизаторах (от англ. Low DropOut). Такое решение приведено на рис. 1. Здесь вывод PG преобразователя n будет подключен к выводу EN преобразователя $n+1$. Такая каскадная конфигурация повторяется для всех напряжений в системе питания в заданной последовательности включения. Чтобы добавить задержку между утверждением флага PG и запуском следующего регулятора в последовательности, к входу разрешения EN следующего регулятора добавляется конденсатор определенной емкости.

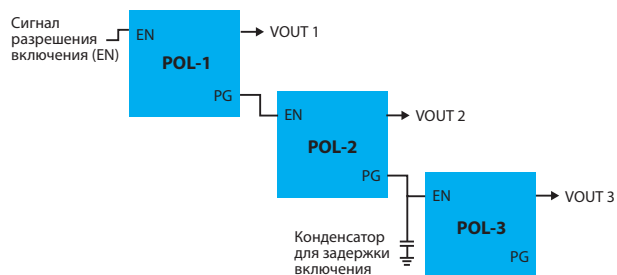


Рис. 1. Использование выводов PG и EN для задания последовательности включения ИП

Это, безусловно, самый простой из возможных вариантов решения, и он, по существу, не требует каких-либо дополнительных затрат на реализацию. Однако у него есть серьезные недостатки. Самый большой минус заключается в том, что этот метод не поддерживает последовательность выключения питания в обратном порядке, т. е. это не совсем то, что мы подразумеваем под понятием секвенирование. Еще один недостаток — то, что изменение уровня утверждения флага PG и, следовательно, задержка сигнала на выводе PG имеют зависимость от температуры. Рис. 2 показывает, что задержка установки флага PG по выходу PG при широком рабочем температурном диапазоне может изменяться в два раза, изменяя при этом и ожидаемую временную задержку включения, требуемую в заданной последовательности подачи напряжений питания.

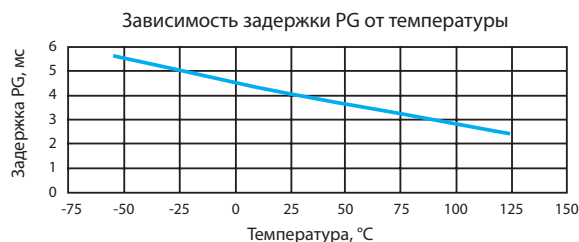


Рис. 2. Зависимость установления флага PG от температуры

Метод В

Точную и независимую от температуры последовательность включения питания может обеспечить дискретное решение с использованием компараторов, резисторов и конденсаторов (рис. 3), но этот метод, как и предыдущий, не позволяет организовать отключение ИП в обратном порядке. Значительная сложность этого решения дает нам преимущества прецизионного контроля уровней напряжения и возможности задержки как включения, так и отключения питания. Однако такое дискретное решение требует дополнительной площади на печатной плате для размещения системы питания и увеличивает общую стоимость конечного решения.

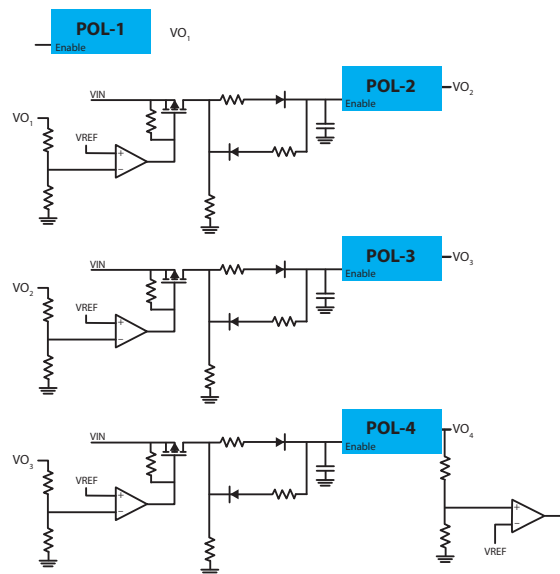


Рис. 3. Дискретное решение, позволяющее реализовать последовательность включения и выключения с необходимыми задержками

Метод С

Два предыдущих метода имеют один общий недостаток, а именно — невозможность корректного отключения напряжений в обратном порядке, что может потребоваться для обеспечения надежности конечной системы. Например, для современных высокопроизводительных FPGA требуется, чтобы напряжения для питания их ядра, вспомогательное питание и напряжения для портов ввода/вывода (I/O) отключились в обратном порядке относительно включения. Такой порядок необходим, чтобы избежать больших сквозных токов и устранить возможное, при несоблюдении очередности отключения, с определенной вероятностью, повреждение не только непосредственно самой дорогостоящей микросхемы, но и связанных с ней по портам цифровых нагрузок. Особая сложность возникает для каскадов со смешанной схемотехникой, когда аналоговые и цифровые схемы используются совместно.

Решить такую проблему возможно при использовании специализированного секвенсора ИП ISL70321SEH, предлагаемого компанией Intersil. Эта микросхема может поддерживать управление алгоритмом включения/выключения до четырех POL-модулей. Кроме того, что немаловажно, она поддерживает еще и каскадирование, т. е. масштабирование системы питания. Преимущества использования предлагаемого аналогового секвенсора — простота решения проблемы в сочетании с контролем уровней напряжений, мониторингом последовательности включения/выключения и неисправностей, что обеспечивает надежную работу всей системы питания, а следовательно, и конечного оборудования. Кроме того, для реализации решения требуется минимум внешних компонентов. Временная диаграмма, показывающая последовательность включения и выключения питания в таком решении, представлена на рис. 4.

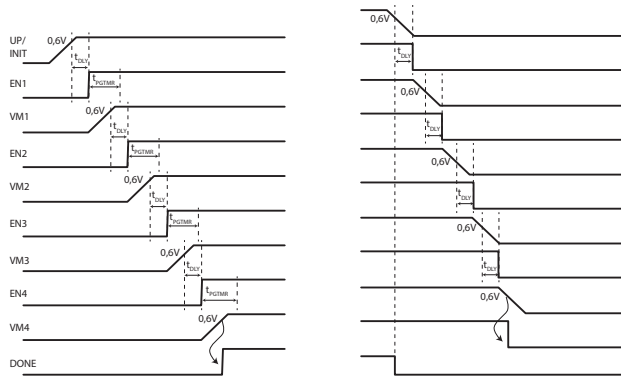


Рис. 4. Схема секвенирования питания применительно к FPGA

На рис. 5 показана схема решения, в котором секвенсор ISL70321SEH используется для формирования последовательной запитки ядра, подачи вспомогательных напряжений и питания портов I/O, т. е. для решения, характерного для типичной высокопроизводительной FPGA. Резистивные делители, подключенные от ИП к соответствующему контакту монитора напряжения (VM), используются для контроля напряжения каждого из питающих напряжений, эти делители

также устанавливают напряжение включения и выключения каждого POL-устройства в заданной последовательности. Точность контроля и установок обеспечивается прецизионными входными компараторами с пороговым напряжением $600\text{ мВ} \pm 1,5\%$. Выходы EN секвенсора ISL70321SEH выполнены в виде ключей на полевых транзисторах с открытым стоком, что позволяет максимально просто управлять стабилизаторами напряжения с самыми различными порогами срабатывания. Программируемые задержки по включению/выключению легко задаются с помощью одного внешнего резистора. Задержка может быть запрограммирована в диапазоне 2–20 мс. Кроме того, здесь используется еще и таймер питания с флагом PG, который необходим для того, чтобы определить, не появилось ли напряжение еще во время запрограммированного окна задержки включения, которое здесь составляет от 4 до 40 мс.

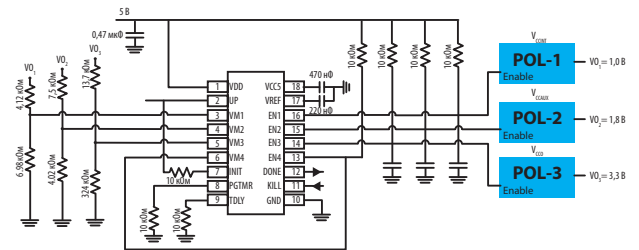


Рис. 5. Пример применения секвенсора ISL70321SEH для управления системой питания с тремя POL-модулями

Как уже было сказано выше, в дополнение к секвенированию напряжений питания секвенсор ISL70321SEH имеет активный мониторинг возможных вариантов сбоя в работе системы питания, что позволяет обеспечить надежное функционирование как самой системы, так и запитанного конечного оборудования. К ним относятся (обозначения отказов приведены в соответствии со спецификацией):

- SEQUENCE ORDER FAULT. Отказ квалифицируется как нарушение порядка последовательности включения/выключения напряжений.
- BROWN OUT FAULT. Неисправность обнаруживается в случае, если после установившегося состояния какое-либо из напряжений на входе мониторов напряжения VMx падает ниже порога выключения (V_{OFF}).
- PGOOD FAULT. Отказ будет обнаружен в случае, если секвенсор ISL70321SEH запрограммирован с периодом ожидания установки флага PG, а напряжение ИП (на входе монитора напряжения VMx) после получения команды разрешения по выходу ENx не достигнет порога включения в течение установленного интервала времени.
- INPUT FAULT. Отказ будет обнаружен в случае, если высокий уровень напряжения на входных контактах VMx будет установлен до получения команды разрешения по выходу ENx.
- INPUT FAULT. Отказ квалифицируется в случае, если изменение состояния входа UP произошло до завершения стадии секвенирования первого канала.
- OUTPUT FAULT. Отказ определяется в случае, если состояние по выходу DONE остается низким после того, как процедура секвенирования прошла и интервал времени, установленный таймером PG, завершился; вывод

DONE будет оставаться на низком уровне до тех пор, пока заданная последовательность включения не будет завершена (подробности см. в спецификации).

- EXTERNALLY TRIGGERED FAULTS — реакция на внешние неисправности (используется вход KILL, подробности см. в спецификации).

Для сложных распределенных систем питания со множеством напряжений, что характерно, например, для радиочастотных и смешанных приложений, число питающих напряжений в распределенной системе питания может быть более десяти. В таком случае, чтобы обеспечить заданную последовательность подачи питания при любом числе ИП, секвенсоры ISL70321SEH можно легко каскадировать, достигая необходимого уровня масштабирования. На рис. 6 показаны необходимые общие подключения секвенсора для 12 блоков питания с организацией их включения/выключения в заданной последовательности и с требуемыми временными задержками. Как видно, для этого достаточно всего трех секвенсоров ISL70321SEH. Благодаря наличию выводов UP, INIT и DONE каскадированные устройства обмениваются данными, необходимыми для организации заданной последовательности включения/выключения всех питающих напряжений.

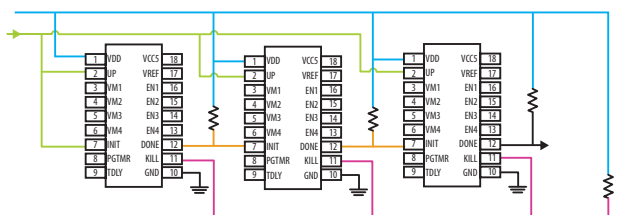


Рис. 6. Организация последовательности включения/выключения системы питания из 12 напряжений

Особенности функционирования электроники в космической среде

Учет эффекта влияния космического излучения на электронные устройства является одним из важнейших моментов в ходе работ по проектированию систем, предназначенных для работы в условиях космического пространства. Они могут вызывать проблемы, начиная от незначительных сбоев самовосстанавливающихся в функционировании отдельных электронных блоков и заканчивая серьезным физическим повреждением таких устройств.

Наиболее распространенными характеристиками, которые нормируют повреждение интегральной схемы, являются допустимая величина накопления полной поглощенной дозы ионизирующего излучения (Total Ionizing Dose, TID) и устойчивость к одиночным случайным эффектам (Single Event Effect, SEE). Негативные эффекты TID являются результатом накопленного воздействия ионизирующего излучения. Эффекты SEE являются результатом воздействия на электронное устройство одиночной частицы высокой энергии. Такое воздействие может вызвать критический переходный процесс на выходе схемы (Single Event Transient, SET) или привести к кратковременному изменению состояния логического выхода. Однако, несмотря на единичный характер такого события, оно также может быть весьма разрушительным, вызывая, например, функциональный отказ устройства из-за одиночного события в виде пробоя истоковой области в мощных МОП-транзисторах (Causing Single Event Burnout,

SEB) или вызванного ионизирующим излучением перехода микросхемы в состояние повышенного потребления тока из-за защелкивания транзистора микросхемы (Single Event Latch-Up, SEL), который в паре с его паразитным транзистором образует тиристор.

Секвенсоры ISL70321SEH, предлагаемые компанией Intersil, предназначены для работы в жестких условиях окружающей среды. Они тестируются на воздействие накопленной дозы радиации 75 крад (Si) (Low Dose Rate, LDR) при малой скорости облучения 0,01 рад (Si)/с, которая более точно соответствует условиям космического пространства, чем высокие скорости, а также на накопление дозы облучения в 100 крад (Si) (High Dose Rate, HDR) при скорости облучения 50–300 рад (Si)/с. Результаты тестирования в части SEE показали отсутствие у секвенсоров ISL70321SEH негативных эффектов категорий SEL и SEB для ионов с линейной передачей энергии $LET_{TH} \leq 86,4 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ при напряжении $V_{dd} \leq 14,7 \text{ В}$, а эффекты типа SET не были зафиксированы для $LET \leq 20 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$.

Стоит отметить, что производитель одновременно выпустил сразу две модификации данного секвенсора — ISL70321SEH и ISL73321SEH, последняя имеет заниженные показатели радиационной стойкости и попадает под категорию EAR99, компоненты данной категории не требуют оформления лицензии и свободны для ввоза на территорию РФ.

Партномер	Стойкость к воздействию накопленной дозы радиации	
	Малая скорость облучения (ELDRS)	Высокая скорость облучения (HDR)
ISL70321SEH	75 крад	100 крад
ISL73321SEH	75 крад	—

Доступны инженерные образцы и отладочные платы.

Заключение

Благодаря появлению первого в отрасли, внесенного в Qualified Manufacturers List (QML) по классу V радиационно-стойкого секвенсора ИП, для разработчиков систем космических летательных аппаратов теперь доступно простое, точное и масштабируемое решение в части секвенирования распределенных систем питания, обеспечивающее должное включение/выключение DC/DC-преобразователей в проектируемых ими системах. Имея уверенность в том, что характеристики системы электропитания не будут меняться даже в суровых условиях космического пространства, инженеры могут использовать в системе распределенного питания столько ИП в виде POL-модулей, сколько им необходимо для гарантии успешного функционирования проектируемых ими космических аппаратов, достигая при этом высокой плотности мощности на единицу объема.



По вопросам применения, заказов образцов и приобретения обращайтесь в департамент высоконадежных компонентов hirel@ptelectronics.ru

¹ Значение LET, начиная с которого частицы могут вызывать одиночные события, называется пороговым уровнем, и именно оно приводится в документации на компонент или изделие.— Прим. перев.