

Сложные задачи разработки DC/DC-преобразователей для миссии на Марсе

Виктор Жданкин (Москва)

Разработка оборудования для миссии на Марсе связана с решением множества уникальных проблем, которые требуют всестороннего понимания вопросов физики материалов и излучений, анализа на схемном уровне и методологии проектирования. В статье обсуждаются вопросы проектирования преобразователей постоянного напряжения для бортовой аппаратуры марсохода Curiosity. Приведены результаты испытаний преобразователей Interpoint, серийно выпускаемых компанией CRANE Aerospace & Electronics, на стойкость к воздействию гамма-излучения с небольшой мощностью дозы.

ВВЕДЕНИЕ

Космическое пространство является жёсткой окружающей средой с предельными температурами, механическими воздействиями и бомбардировкой элементарными частицами с различной энергией. Кроме обеспечения стойкости к этим дестабилизирующим факторам, космическая аппаратура должна надёжно работать в течение 15 лет или более, включая до 5 лет наземных испытаний. Одной из важнейших задач создания космических аппаратов с длительным сроком активного существования является обеспечение требуемой стойкости бортовой аппаратуры к воздействиям ионизирующих излучений.

Надёжное питание оборудования зонда для полёта на Марс является сложной задачей для разработчиков преобразователей постоянного напряжения [1–3]. Объём работ по квалификации преобразователя для применения в космической аппаратуре является значительным, и поэтому преимуществом пользуются устройст-

ва с подтверждёнными техническими характеристиками для бортовой аппаратуры космических аппаратов. Для обеспечения непрерывного безотказного функционирования оборудования важно проанализировать воздействие наихудшего сочетания внешних факторов, учитывая предельные значения параметров компонентов с коэффициентом запаса к нормам.

Длительный жизненный цикл космических приборов обязывает разработчика преобразователей применять компоненты, которые будут оставаться доступными в течение десятилетий. Применение микросхем с высокой степенью интеграции является рискованным, поскольку они, как правило, имеют короткий жизненный цикл, синхронизированный с изменениями технологии производства. Конструкция на дискретных компонентах с подтверждёнными параметрами часто является наилучшим решением для преобразователей космической категории качества (Space).

Применение отдельных компонентов вместо стандартных интегральных микросхем преобразователей предоставляет разработчику большую гибкость в выборе топологии устройства и метода регулирования. Космическое пространство характеризуется большим перепадом температур (–130...+125°C), поэтому при выборе компонентов необходимо провести детальные исследования их параметров под воздействием предельных температур.

Проникновение в космос является рискованной операцией, которая требует огромного внимания к механической конструкции преобразователя. Способ крепления особенно важен для крупногабаритных компонентов, таких как трансформаторы и накопительные конденсаторы. На рисунке 1 показана конструкция радиационно-стойкого DC/DC-преобразователя серии SMHF без защитной крышки. Следует принимать во внимание даже тип маркировочной краски для изделия, с учётом требований к содержанию летучих конденсируемых веществ (Collected Volatile Condensable Material, CVCМ) и устойчивости к дегазации, измеряемой по общей убыли массы (Total Mass Loss, TML).

ВОЗДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ

Если преобразователь используется в бортовой аппаратуре космической техники, он должен выдерживать воздействие радиации, которая включает ионизирующие излучения низкой и высокой интенсивности, протоны и ионы солнечных и галактических космических лучей, вызывающие в изделиях электронной техники одиночные дефекты и структурные повреждения кристаллической решётки из-за смещения атомов (Displacement Damage) под воздействием высокоэнергетических протонов и нейтронов.

Характер повреждения зависит от массы частицы, скорости и вещества, с которым взаимодействует частица. Результатом может быть непредсказуемое изменение состояния логических схем или общий сбой в работе вследствие радиационного защёлкивания транзисторов в открытом состоянии, что часто наблюдается в КМОП- и БиКМОП-приборах. Общепринятая классификация одиночных эффектов представлена в [4, 5].

Дефекты образуют узлы захвата и сокращают время жизни носителей малой концентрации. В отличие от



Рис. 1. Конструкция гибридно-плёночного DC/DC-преобразователя серии SMHF (крышка снята)

повреждений, создаваемых непосредственно ионизирующим излучением, структурное повреждение часто является необратимым. Оно ухудшает характеристики светочувствительных устройств, уменьшая коэффициенты передачи тока транзисторов, особенно при низких плотностях тока, и может понижать коэффициент рекомбинации во многих полупроводниковых приборах с дополнительной примесной проводимостью.

Во время 8-месячного полёта зонда Curiosity к Марсу произошли три мощные вспышки на Солнце, которые вызвали всплеск солнечных космических лучей (SME – Solar Mass Ejections), многократно превысивший фоновое излучение. Солнечная радиация состоит из потока высокоэнергетических протонов, или α -частиц, высокоэнергетических электронов, или β -частиц, нейтронов, тяжёлых ядер, электромагнитных полей, γ -излучения и рентгеновских лучей, и этот поток может быть непосредственно ионизирующим или косвенно ионизирующим.

Ионизирующее излучение может служить причиной повышения напряжения и тока смещения в биполярных усилителях и компараторах, сужения полосы пропускания биполярных усилителей, уменьшения коэффициента усиления биполярных транзисторов, отрицательного смещения затвора МОП-транзисторов. Нейтроны вызывают ионизирующее излучение косвенно, когда они взаимодействуют с полупроводниковыми приборами. Это приводит к нестабильности атомов, излучающих гамма- или альфа-частицы при радиоактивном распаде.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Для уменьшения влияния дестабилизирующих факторов космического пространства была предложена следующая методология проектирования преобразователей постоянного напряжения [1]:

- обеспечение значительного ограничения допустимых значений напряжения для активных устройств;
- повсеместное использование токоограничительных резисторов;

- выбор топологии для источника с высоким импедансом (обратноходовой или с подачей тока);
- использование МОП-транзисторов, стойких к пробоев подзатворного диэлектрика (SEGR, Single Event Gate Rapture) и к превышению скорости нарастания напряжения;
- проектирование с учётом резкого уменьшения коэффициента усиления транзистора;
- проектирование с использованием микросхем с ограниченной сложностью;
- применение биполярных усилителей, которые наименее чувствительны к ионизирующему излучению;
- использование схемотехнических решений, которые допускают значительные изменения напряжения смещения и тока смещения;
- выключение МОП-транзисторов отрицательным напряжением затвористок для компенсации пороговых смещений в наихудшем случае;
- испытание и отбор всех чувствительных компонентов на стойкость к радиации.

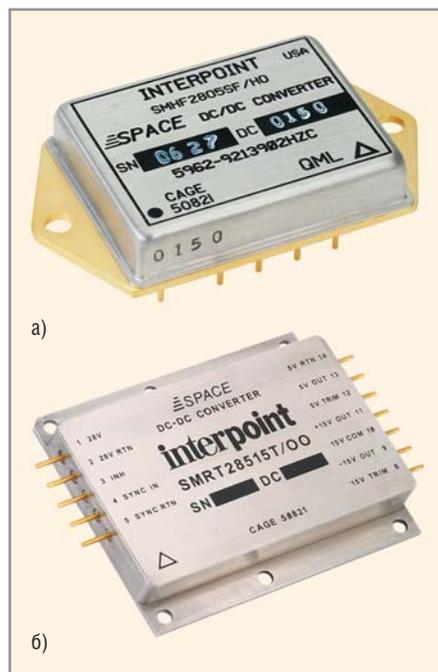


Рис. 2. Внешний вид радиационно-стойкого интегрально-гибридного DC/DC-преобразователя серии SMHF с крепёжными фланцами (а) и радиационно-стойкого DC/DC-преобразователя серии SMRT (б)



Рис. 3. Внешний вид DC/DC-преобразователя серии SLH

Отбор компонентов по радиационной стойкости характеризуется проблемами, связанными с арендой времени на ускорителях элементарных частиц, радиоактивной природой нейтронов и длительностью испытаний, требуемых для определения характеристик устройства при низких интенсивностях ионизирующего излучения, наблюдаемого в космическом пространстве (ELDRS – Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, мощность дозы ниже 10^{-3} – 10^{-2} рад (SiO_2)/с).

Разработка оборудования для миссии на Марсе связана с решением множества уникальных проблем, которые требуют всестороннего понимания вопросов физики устройства, материаловедения, особенностей передачи тепла, космического излучения, анализа на схемном уровне и методоло-

гии проектирования для уменьшения влияния специфических дестабилизирующих факторов космического пространства.

Производители DC/DC-преобразователей, такие как Crane Aerospace & Electronics, отреагировали на возрастающую сложность требований и испытаний DC/DC-преобразователей и помехоподавляющих фильтров космической категории качества. Разработка и производство такой техники является специализированной отраслью промышленности. Продукция компании Crane Electronics (поставляемая под торговой маркой Interpoint) применялась во многих программах NASA, включая всё ещё функционирующую миссию Cassini-Huygens Saturn, а также в автономном планетарном зонде Curiosity (Mars Science Laboratory, MSL).

Миссия марсохода «Любопытность»

Зонд Curiosity был запущен с космодрома Air Force Station, расположенного на мысе Канаверал, 26 ноября 2011 года ракетой Atlas V, а 5 августа 2012 года совершил посадку на Марс в районе кратера Гейла. Этот наиболее сложный из когда-либо разработанных планетарных зондов содержит в 10 раз больше научного оборудования, чем его предшественники Spirit и Opportunity. Основной задачей Curiosity является исследование того, мог ли Марс когда-либо предоставлять благоприятные условия для жизни бактерий, а также пригодности Марса для организации поселений будущих исследовательских экспедиций.

В результате 100-дневной работы марсохода Curiosity были обнаружены вода в грунте [6], органика небиологического происхождения и были проведены измерения радиации. Если человек решит отправиться на Красную планету, то кроме жуткого холода и разреженного воздуха он подвергнется риску получить опасную дозу радиации. Марсоход Curiosity оказался первым земным аппаратом, который сделал измерения заряженных частиц с помощью американского прибора RAD. За первые сто дней он зафиксировал несколько вспышек на Солнце, в результате которых поток заряженных частиц резко вырос. Однако, как показали расчёты, оболочка аппарата сократила

мощность этих доз в несколько раз. Результаты измерений прибора RAD были дополнены данными прибора HEND (изготовитель ИКИ РАН, Россия), установленного на вращающемся по марсианской орбите аппарате Mars-Odissey. В отличие от американского прибора, он способен регистрировать нейтроны низких энергий. Мониторинг радиационной обстановки на Марсе очень важен в связи с подготовкой будущих полётов обитаемых космических аппаратов.

В аппаратуре зонда Curiosity применены девять различных серий DC/DC-преобразователей и помехоподавляющих фильтров компании CRANE Electronics, включая SMFLHP, SMRT, SMHF и SFME. На рисунке 2 показан внешний вид DC/DC-преобразователей Interpoint. Помехоподавляющие фильтры дополняют DC/DC-преобразователи, упрощая обеспечение соответствия системы требованиям стандарта MIL-STD-461 к помехам излучения и кондуктивным помехам.

Изделия Interpoint поддерживали программы NASA в течение многих лет, включая аппарат Cassini-Huygens, запущенный в 1997 году, который продолжает посылать ценные сведения о Сатурне и его спутниках.

Ниже представлены результаты испытаний преобразователей компании CRANE Aerospace & Electronics на воздействие ионизирующих излучений низкой интенсивности, которые были получены при подготовке изделий для бортовой аппаратуры зонда Curiosity.

Историческая справка

Изделия, предназначенные для применения в бортовой аппаратуре космической техники, были разработаны во времена, когда стандартные радиационные испытания осуществлялись при высокой мощности дозы (HDR). В последние пять лет были проведены дополнительные испытания этих изделий при низких мощностях поглощённой дозы (LDR), согласующихся с ELDRS. Уверенность в корректном поведении продукции космической категории качества при мощностях ELDRS основана на том, что испытания проведены как на компонентном уровне, так и на уровне преобразователей.

Испытаниям были подвергнуты DC/DC-преобразователи серий SLH (см. рис. 3), SMSA, SMHF, SMTR и SMRT, изготовленные компанией Crane Electronics. Эти изделия содержат ограниченный набор биполярных ИС, которые являются потенциально чувствительными к суммарной накопленной дозе ионизации при очень низкой мощности дозы (менее чем 10 мрад (Si)/с). Перечень ИС, используемых в конструкции преобразователей, приведён в таблице 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Четыре биполярных ИС, используемых в популярных сериях преобразователей Crane Electronics:

- LM119 – двоянный компаратор, приобретённый у компании National Semiconductor в виде кристалла MD8. Этот кристалл тестировался на воздействие радиации согласно руководящему техническому документу (Source Control Drawing, SCD), который содержит пострадиационные ограничения, обнаруженные компанией Crane Electronics (CEI);
- LM136 – прецизионный источник опорного напряжения на 2,5 В, приобретённый у National Semiconductor как кристалл MDR, с гарантированным значением предельной накопленной дозы 100 крад (Si), подтверждённой при воздействии ионизирующего излучения с высокой мощностью дозы;
- LM158 – двоянный операционный усилитель, приобретённый у компании National Semiconductor как кристалл MDE с гарантированными и установленными для партии параметрами радиационной стойкости при низких мощностях дозы (ELDRS). В преобразователях применяются микросхемы LM158 или MC34072;
- MC34072 – двоянный операционный усилитель, приобретённый у компании On Semiconductor и испытанный по руководящему техническому документу (SCD), который содержит пострадиационные ограничения, обнаруженные компанией Crane Electronics.

Результаты исследований микросхемы LM119

Микросхема LM119 является единственным прибором, используемым в

дискретной реализации схемы ШИМ во всех упомянутых преобразователях Interpoint. Устройство представляет собой двоянный компаратор, одна часть которого функционирует в качестве генератора тактовых импульсов с гистерезисом, а вторая часть – в качестве компаратора ШИМ-контроллера. Возможным результатом воздействия радиации является изменение частоты генератора, однако он не чувствителен к весьма значительным изменениям напряжения и тока смещения.

Изменения напряжения смещения действуют в одинаковом направлении на обоих уровнях цикла гистерезиса и приводят к сдвигу рабочей точки, но не величины гистерезиса. Схема генератора устойчива к напряжению смещения 100 мВ, что во много раз больше, чем можно ожидать от воздействия ионизирующего излучения с низкой мощностью дозы. Изменение тока смещения также приводит к положительному или отрицательному сдвигу рабочей точки, но поскольку обе точки смещаются в одном направлении, частота генерации не изменяется.

Другая половина ИС LM119 используется в качестве ШИМ-компаратора, диапазон синфазной помехи на входах составляет от 1,2 до 6 В при изменении коэффициента заполнения от 0 до 60%. Сдвиг рабочей точки, вызванный изменением напряжения или тока смещения на входе, не влияет на коэффициент заполнения, поскольку высокое значение коэффициента петлевого усиления при разомкнутом контуре обратной связи стабилизирует рабочую точку, что необходимо для достижения правильного коэффициента заполнения и, соответственно, выходного напряжения.

Схема ШИМ-контроллера на основе ИС LM119 тестировалась [3] при воздействии низких мощностей (поглощённых) доз ионизирующих излучений (ELDRS) до значений поглощённых доз 50 крад (Si) и 100 крад (Si) со смещением частоты на 1%. При сопоставлении данных для поглощённой дозы 100 крад (Si), полученных при воздействии большой мощности дозы (HDR) и низкой мощности дозы (LDR), различий не обнаружено. Эта же схема много раз была испытана при больших мощностях дозы (HDR) до поглощённой дозы 450 крад

(Si), опять с изменением частоты менее чем на 1%.

Результаты исследований микросхемы LM136

Микросхема LM136 применяется во всех изделиях космической категории качества компании Crane Electronics в качестве источника опорного напряжения, относительно которого устанавливается выходное напряжение. Дрейф выходного напряжения является суммой смещения опорного напряжения и входного напряжения смещения усилителя. Значения этих смещений, измеренные под воздействием низкой мощности дозы ионизирующего излучения, могут быть использованы для определения суммарного дрейфа. Сравнение значений, полученных при испытаниях воздействиями доз высокой и низкой мощности, может быть использовано для определения предельной накопленной дозы при воздействии ионизирующего излучения небольшой мощности.

В данных, полученных при испытаниях преобразователя SMRT на воздействие небольшой мощности дозы ионизирующего излучения (ELDRS) при поглощённой дозе 100 крад (Si), обнаружены смещение выходного напряжения на 0,5% и отсутствие различий между результатами испытаний при HDR и LDR. При испытании ИС LM136 воздействием высокой мощности дозы до значения поглощённой дозы 100 крад (Si) получено устойчивое изменение выходного напряжения на 0,3%. Результаты испытаний модуля серии SMSA воздействием мощностей доз ELDRS до поглощённой дозы 50 крад (Si) показали смещение выходного напряжения на 0,3% и подтвердили различия при испытаниях на LDR и HDR.

Результаты исследований микросхемы MC34072

Эта биполярная ИС операционного усилителя применяется для формиро-

Таблица 1. Перечень биполярных ИС, применяемых в DC/DC-преобразователях Interpoint

Серия	ИС
SLH	LM136
SMSA	LM119, LM136, LM158
SMHF	LM119, LM136, LM158 или MC34072
SMTR	LM119, LM136, LM158 или MC34072
SMRT	LM119, LM136, LM158

Таблица 2. Результаты испытаний компонентов DC/DC-преобразователей на ELDRS

Изделие	Компонент	Партия пластины		Мощность дозы	Суммарная накопленная доза ионизации
SMRT	LM158	JM084X27-WS		<=10 мрад(Si)/с	100K
SMRT	LM136	JM0CX16-W10			100K
SMRT	LM119	J2098325-W6			100K
MFP	LM136	JM05CX201-W10			100K
SMSA2815S	LM136	J206B7482	JM0637042	0,02 рад(Si)/с	50K
SMSA2815S	MC35072	P550F100N-W38	P536F100L-W18		50K
SMSA2815S	LM119	J20667341	J205B6252-W6		50K
Компонент	MC35072	HM069063		10 мрад(Si)/с	32,4K
Компонент	LM136	A122M002-W1		5 мрад(Si)/с	32,4K
Компонент	LM119	J205B6252		10 мрад(Si)/с	5K

Таблица 3. Результаты испытаний преобразователя SMRT на воздействие ионизирующего излучения с мощностью дозы 10 мрад(Si)/с

Воздействие	Несмещённый Частота коммутации, кГц				Смещённый Частота коммутации, кГц			
	S/N157	смещение, %	S/N170	смещение, %	S/N176	смещение, %	S/N218	смещение, %
0K	293		294		291		291	
20K	294	0,341297	295	0,340136	292	0,343643	285	-2,06186
40K	295	0,682594	296	0,680272	292	0,343643	292	0,343643
60K	295	0,682594	297	1,020408	292	0,343643	293	0,687285
80K	295	0,682594	297	1,020408	292	0,343643	293	0,687285
100K	295	0,682594	298	1,360544	293	0,687285	293	0,687285
168-часовой отжиг при +100°C	294	0,341297	294	0	291	0	291	0

Таблица 4. Изменение входного тока (А) работающего преобразователя SMSA2815S для различных значений поглощённой дозы (входное напряжение 31 В, ток нагрузки 300 мА)

Поглощённая доза, крад (Si)	Контрольный образец	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Среднее значение
0	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0030
2	0,003	0,003	0,0029	0,0029	0,0029
5	0,0029	0,0028	0,0027	0,0028	0,0028
7	0,0029	0,0028	0,0027	0,0027	0,0027
10	0,0029	0,0027	0,0027	0,0025	0,0026
15	0,0029	0,0028	0,0027	0,0027	0,0027
30	0,0028	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027
50	0,0031	0,0029	0,0029	0,0028	0,0029
Отжиг	0,0031	0,0029	0,0029	0,0028	0,0029

Таблица 5. Изменение выходного напряжения преобразователя SMSA2815S под воздействием ионизирующего излучения

Поглощённая доза, крад (Si)	Контрольный образец	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Среднее значение
0	14,930	14,951	14,913	14,927	14,93033
2	14,975	14,961	14,914	14,926	14,93367
5	14,978	14,974	14,910	14,934	14,93933
7	14,977	14,973	14,922	14,935	14,94333
10	14,978	14,972	14,930	14,940	14,94733
15	14,978	14,920	14,936	14,950	14,93533
30	14,978	14,985	14,952	14,981	14,97267
50	14,978	14,955	14,945	14,978	14,95933
Отжиг	14,930	14,951	14,913	14,961	14,94167

вания сигнала ошибки, когда существует разность между опорным и выходным напряжением преобразователя. Усиленное напряжение ошибки управляет ШИМ-контроллером для воздействия на выходное напряжение. Как и в случае ИС LM136, сумма смещения в усилителе и источнике опорного напряжения может проявляться как изменение выходного напряжения.

Испытания преобразователя серии SMSA (см. рис. 4), содержащего ИС из двух разных партий кремниевых пластин MC34072, до поглощённой дозы 50 крад (Si) показали смещение выходного напряжения на 0,3% (LDR и HDR). Это смещение, скорее всего, относится только к источнику опорного напряжения (LM136).

Выводы

Каждый из трёх компонентов, определённый как потенциально чувствительный к воздействию ELDRS, был многократно испытан на компонентном уровне и в составе преобразователей. Микросхема источника опорного напряжения LM136 была испытана 4 раза в составе преобразователя, 1 раз на компонентном уровне (каждый раз для различных партий). Микросхема LM119 была испытана 3 раза в составе преобразователей (каждый раз с различными партиями) и один раз на компонентном уровне. Микросхема MC34072 была испытана 2 раза в составе изделий и 1 раз как отдельный компонент; каждое испытание проводилось для разных партий.

Согласованность результатов испытаний каждого компонента, по меньшей мере, для 3 партий пластин значительно уменьшает риск потенциальной проблемы ELDRS при использовании этих компонентов. Кроме того, преобразователи были спроектированы так, чтобы минимизировать влияние радиации, вызывающей изменения технических параметров. Подробные результаты испытаний приведены в [3]. Результаты испытаний каждого из этих компонентов кратко представлены в таблице 2.

Результаты испытаний преобразователя серии SMRT на воздействие мощности дозы ELDRS представлены в таблице 3 (исследование изменения частоты преобразования). Другие таблицы с результатами испытаний DC/DC-преобразователя SMRT283R3S представле-

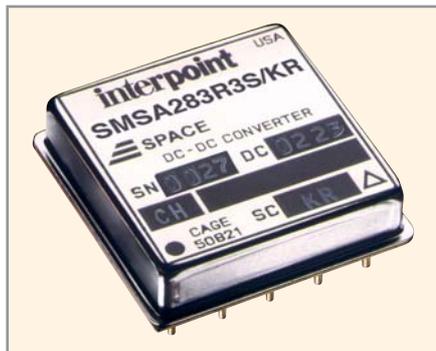


Рис. 4. Внешний вид преобразователя серии SMSA

ны в отчёте [3]. Отдельные результаты испытаний преобразователя серии SMSA2815S представлены в таблицах 4 и 5; подробные результаты изложены в отчёте [7]. Значения параметров всех испытываемых образцов DC/DC-преобразователей SMSA2815S оставались в пределах спецификации до значения поглощённой дозы 50 крад (Si) после воздействия гамма-излучения с мощностью дозы 20 мрад (Si)/с.

Испытания различных партий ИС, потенциально чувствительных к воздействию ионизирующих излучений космического пространства и приме-

няемых в изделиях космической категории качества компании Crane Aerospace & Electronics, не выявили эффекта уменьшения величины предельной накопленной дозы радиации для биполярных приборов под воздействием ионизирующего излучения с низкой мощностью дозы (ELDRS). Испытания биполярных ИС были проведены как в составе преобразователей, так и отдельно. Кроме того, конструкция преобразователей не чувствительна к изменению параметров ИС в результате воздействия ионизирующих излучений, что минимизирует влияние накопленной дозы радиации, независимо от её мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dave Perchlik*. Challenges of Designing Voltage Converters for a Mission to Mars. CRANE Aerospace & Electronics, 2012.
2. NASA's Mars Science Lab, Curiosity, Lands on Mars with Interpoint DC-DC Converters. News Release. CRANE Aerospace & Electronics, 2012.
3. *Jay Kuebny, David Perchlik*. Low Dose Rate Effects on Crane Space Products. CRANE

Aerospace & Electronics, February 17, 2012.

4. *Анашин В.С.* Средства контроля воздействия ионизирующих излучений космического пространства на РЭА космических аппаратов в области одиночных эффектов. Датчики и системы, 2009, № 9.
5. *Анашин В.С.* Общие вопросы обеспечения стойкости РЭА космических аппаратов к ионизирующим излучениям космического пространства за счёт ЭКБ. Тезисы докладов семинара «Контроль стойкости электронной компонентной базы к ионизирующим излучениям космического пространства для её применения в радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов», РОСКОСМОС, 12 декабря 2012.
6. Первые результаты российского эксперимента ДАН на борту марсохода НАСА Curiosity, работающего на поверхности Марса. ИКИ РАН, сообщение пресс-службы, 2012.
7. *Stephen Buchner, Christian Poivey, Jim Forney, Hak Kim*. TID Test Report SMSA2815S (Interpoint) DC-to-DC Converter. G07SEP_SMSA2815_TID. NASA/GSFC, 6th November, 2007.

