

Расчёт величин MTBF для гибридных интегральных схем с использованием редакций военного справочника MIL-HDBK-217F, Notice 1 и 2

Ричард Миллер

Перевод: Жданкин Виктор

Изменения в модель для оценки интенсивности отказов изделий, выполненных по гибридной технологии, включённые в редакцию Revision F военного справочника MIL-HDBK-217 Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment, привели к значительному уменьшению рассчитанных значений среднего времени наработки между отказами (Mean Time Between Failures — MTBF) по сравнению с редакцией Rev E. Специалистами компании International Rectifier было проведено исследование причин, вызвавших это снижения численных показателей надёжности. Расчёты величины MTBF на основе этих моделей дают результаты, которые не согласуются с результатами, основанными на моделях, представленных в редакции Revision E военного справочника MIL-HDBK-217. Для пояснения этого различия представлены величины MTBF, рассчитанные для DC/DC-преобразователя ART28515T (International Rectifier HiRel) с использованием редакции справочника MIL-HDBK-217F Notice (извещение) 2 и MIL-HDBK-217E. Кроме того, представленные вычисления включают применение различных поправок к коэффициентам в модель гибридных интегральных схем. Величины MTBF, полученные в результате каждого из этих расчётов, обобщены для сравнения в таблице I. Для обзора представлены поправки, использованные в этих расчётах, и исследование, обосновывающее их использование в модели элемента справочника MIL-HDBK-217F. Статья является авторским переводом документа [1].

Возможно, статья будет полезна для расчётной оценки надёжности аппаратуры специалистам службы надёжности предприятий, применяющих наряду с отечественными электронными компонентами компоненты американского производства, характеристики надёж-

ности которых приводятся в справочнике MIL-HDBK-217F.

Уровень надёжности преобразователей напряжения в значительной степени определяет и надёжность аппаратуры в целом. Оценка надёжности преобразователей напряжения проводится расчётными методами, основанными на математических моделях эксплуатационной интенсивности отказов. Определение численного показателя надёжности — среднего времени наработки до отказа (Mean Time Between Failure — MTBF) — выполняется по типовому стандарту расчёта надёжности MIL-HDBK-2017F2 Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment. Последняя редакция справочника датируется 1995 годом, после этой даты табличные значения справочника больше не обновлялись. Принятые интенсивности отказов некоторых компонентов не соответствуют текущим реальным значениям. Например, справочник указывает очень высокую интенсивность отказов интегральных микросхем. Для оценки надёжности изделий, предназначенных для военных и специальных применений, в справочнике используется база данных на компоненты военного назначения. Документ допускает два метода расчёта среднего времени наработки на отказ компонентов.

Первый метод известен как Parts Count Method и второй метод как Parts Stress Analysis Method. Для расчёта MTBF с использованием второго метода обычно используются данные из отчёта Electrical/Thermal Stress and Derating Analysis Report (Отчёт по анализу электрической/температурной нагрузки и ограничений допустимых условий эксплуатации). Этот метод даёт более реалистичную величину, потому что прогнозирование интенсивности отказов каждого элемента основано на реальном использовании этого элемента в системе. Метод Parts Count Method

просто допускает одинаковую интенсивность отказов для каждого типа элемента независимо от условий его применения.

Выполнение метода прогнозирования надёжности по коэффициентам загрузки (Part Stress Analysis) предполагает, что радиоэлектронная аппаратура работает при нормальных условиях. Этот метод имеет несколько преимуществ перед методом количественного анализа (Total Parts Count), который предполагает наличие самой минимальной информации, такой как общее количество элементов, уровень их качества и условия среды их эксплуатации.

Основным преимуществом метода прогнозирования надёжности по коэффициентам загрузки элементов в конкретной схеме (Part Stress Analysis) является то, что он учитывает значения коэффициентов загрузки элемента для расчёта отдельных интенсивностей отказов. В этом методе вычисленные интенсивности отказов для каждого элемента складываются вместе для вычисления общей интенсивности отказа устройства. Отдельные интенсивности отказов зависят от следующих параметров: значения коэффициента загрузки элемента, категории качества, температуры, условий окружающей среды и значения интенсивности отказа элемента из базы данных. Основным недостатком этого метода является то, что элементы схемы, которые включены в конструкцию для резервирования, имеют противоположное воздействие на MTBF. На самом деле, правильно спроектированное резервирование будет иметь положительное влияние на общую надёжность системы.

Мощность рассеяния и коэффициент загрузки элемента при наихудшем случае используются для вычисления повышения температуры кристалла по отношению к температуре корпуса (перегрев). Использование повы-

шенной температуры кристалла по сравнению с температурой корпуса (перегрев), когда определяются эксплуатационные интенсивности отказов элементов, превосходит требования стандарта MIL-HDBK-217F. Зона температурного максимума кристалла и процентные соотношения загрузки приводятся в документе Thermal/Electrical Stress Analysis (Анализ температурной и электрической нагрузки). Анализ (расчёт), который сформирован вычислениями загрузки компонента, являлся расчётом предельного значения.

Основные концепции надёжности источников питания подробно рассматриваются, например, в работах [2, 3]. Объясняются различия в численных показателях надёжности, публикуемых различными изготовителями источников питания и приводятся примеры корректного использования информации о надёжности.

Далее, собственно, представлены компоненты, влияние которых на расчёт надёжности гибридных интегральных схем было пересмотрено в последней редакции американского военного справочника MIL-HDBK-217F.

1. Резисторы. Первоначально включённый в редакцию справочника MIL-HDBK-217E алгоритм для расчёта интенсивности отказов резисторов, размещённых на керамической подложке интегральных схем (ИС), выполненных по толстоплёночной гибридной технологии, был исключён из издания справочника MIL-HDBK-217F. Так как резисторы являются составляющей интегральной частью гибридной подложки и, как правило, более надёжны, чем установленная надёжность (Established Reliability) типов, используемых в негибридных схемах, считается, что они имеют незначительное влияние на суммарную интенсивность отказов, и поэтому их исключение можно считать обоснованным. Модель для гибридных интегральных схем справочника MIL-HDBK-217F рекомендует, чтобы резисторы не учитывались, за исключением тех случаев, когда гибридная интегральная схема сконструирована в основном из пассивных компонентов. Применительно к DC/DC-преобразователям можно согласиться этими с оценками. Включение резистивных элементов в расчёт MTBF имеет

Сравнение расчётов интенсивности отказов для преобразователя напряжения ART28515T

Номер варианта	Условия применения, предположения и несоответствия (условия космического полёта (Space Flight – SF), температура корпуса = +45°C, $V_{\text{окд}} = 28 \text{ В}$)	Интенсивность отказов (отказы/106 ч)	MTBF, (ч)
1	MIL-HDBK-217E Периметр герметизации = 8,75" Площадь = 1,742 дюйм ² Биметаллическое соединение = 155 Резисторы = 62	0,191775	5 214 439
2	MIL-HDBK-217F Notice 2 $\pi_r = 1,0$ – для электромагнитных компонентов $\pi_c = 5,8$ – все другие компоненты $\pi_Q = 0,03$ – для конденсаторов CDR	0,189660	5 272 594
3	MIL-HDBK-217F Notice 2 $\pi_r = 5,8$ – все компоненты, включая электромагнитные $\pi_Q = 0,03$ – для конденсаторов CDR	0,353735	2 826 973
4	MIL-HDBK-217F Notice 2 $\pi_r = 1,0$ – для электромагнитных компонентов $\pi_c = 21$ – для силовых полупроводников $\pi_r = 5,8$ – для других компонентов $\pi_Q = 0,03$ – для конденсаторов CDR	0,355031	2 816 651
5	MIL-HDBK-217F Notice 2 $\pi_r = 21$ – для всех компонентов (включая электромагнитные) $\pi_Q = 0,03$ – для конденсаторов CDR	1,28077	780 783

незначительное влияние на вычисленную величину.

2. Конденсаторы. Модель гибридной интегральной схемы, представленная в редакции справочника MIL-HDBK-217F, предполагает коэффициент (π_Q), характеризующий систему контроля качества, равным 1 для каждого компонента, и, кроме того, к гибридным интегральным схемам с уровнем качества Class K (наивысший уровень качества Space, установленный в технических условиях MIL-PRF-38534) применяется общий коэффициент π_Q , равный 0,25. Большая часть многослойных керамических конденсаторов (тип CDR, производство Vishay), используемых в преобразователях серии ART, приобретаются с уровнем надёжности S. Для этого типа конденсаторов в справочнике MIL-HDBK-217F для коэффициента π_Q установлено значение 0,03, что составляет 1/8,3 от разрешённого для использования в гибридных интегральных схемах значения π_Q 0,25. Специалисты IR полагают, что отсутствует обоснование для применения санкций к интенсивности отказов таких конденсаторов повышением коэффициента качества π_Q в 8,3 раза, только потому, что они применяются в гибридных интегральных схемах. Заметим, что повышение коэффициента качества (π_Q) означает уменьшение ве-

личины MTBF. Как отмечено в представленной таблице, для того чтобы обойти эту проблему к интенсивности отказов всех конденсаторов типа CDR был применён поправочный коэффициент $0,03/0,25 = 0,12$. В первоначальном справочном листке технических данных преобразователя ART28515T была указана величина MTBF, рассчитанная по изданию справочника MIL-HDBK-217F Notice 1. Обширные исправления были сделаны в издании MIL-HDBK-217F Notice 2 для упрощения определения интенсивности отказов конденсаторов. Эти исправления утроили расчётную интенсивность отказов многослойных керамических конденсаторов типа CDR. Только это изменение снизило величину MTBF на 30%, если сравнивать редакции Notice 1 и Notice 2 справочника MIL-HDBK-217F.

3. Электромагнитные компоненты. Все электромагнитные компоненты, используемые в гибридно-плёночных DC/DC-преобразователях компании IR HiRel, созданы из материалов, рассчитанных для работы при температуре +200°C или выше. Снижение номинальных параметров согласно требованиям стандарта MIL-STD-975 ограничивает рабочую температуру до +150°C. Силовой трансформатор модуля преобразователя напряжения ART28515T имеет измеренный пе-

регрев менее чем +33°C относительно температуры корпуса (в то время как измеренная температура корпуса около +100°C). Все другие индуктивные элементы нагреваются выше температуры корпуса на 5–15°C. Случаи отказов в процессе эксплуатации DC/DC-преобразователей серии ART, вызванные электромагнитными компонентами, неизвестны. Модель для гибридных интегральных схем, созданная по методике справочника 217F, была разработана без учёта электромагнитных/индуктивных компонентов и предполагает, что они не будут учтены, если схема состоит главным образом из пассивных компонентов. Следовательно, в справочном листке технических данных серии ART величина MTBF была рассчитана согласно 217F Notice 1, без учёта вклада электромагнитных элементов. В настоящее время специалисты IR полагают, что все магнитные компоненты должны быть учтены в расчёте, но не должны быть обременены дополнительным функциональным коэффициентом π_f . Как отмечено в таблице, поправочный коэффициент $1/\pi_f$ был применён к интенсивности отказов индуктивных компонентов, чтобы получить действительные значения коэффициента $\pi_f = 1$.

4. Комплексный функциональный коэффициент π_f , учитывающий дополнительные влияния, вызванные взаимодействием компонентов. Данные, используемые для формирования модели гибридной интегральной схемы в издании 217F Notice 1, которые привели к функциональному коэффициенту (π_f), равному 21 для силовых гибридных интегральных схем, были получены главным образом от одного производителя гибридных интегральных схем и состоят по большей части из технологического процесса, имеющего отношение к отказам, затрагивающим герметизацию, присоединение подложки, прикрепление кристаллов и интерметаллические соединения алюминий/золото. Для DC/DC-преобразователей компании IR Nirel, в которых используются квалифицированные материалы и технологические процессы (включая изделия промышленной и военной категории качества,

представленные десятками тысяч отгруженных модулей), при эксплуатации неизвестны случаи с такими видами отказов. Это относится к преобразователям серии ART и другим многочисленным преобразователям напряжения категории качества Class H и Class K. Специалисты компании IR полагают, что установление комплексного функционального коэффициента равным 21 для силовых гибридных микросхем, классифицированных по Class K, необоснованно ухудшает расчётные характеристики DC/DC-преобразователей, что не подтверждается реальной практикой эксплуатации. Так как DC/DC-преобразователи являются в основном схемами с линейным регулированием с несколькими силовыми компонентами, величина MTBF должна быть рассчитана с использованием комплексного функционального коэффициента 5,8 (применяемого к линейным схемам). С целью сравнения расчёт с применением значения $\pi_f = 21$ для всех компонентов и другой, использующий для силовых устройств коэффициент $\pi_f = 21$ и $\pi_f = 5,8$, применённый к остальным компонентам схемы, представлены в вариантах 4 и 5 (см. таблицу).

Одним из недостатков методов прогнозирования надёжности, предложенных в справочнике MIL-HDBK-217F, Notice 2, является требование использовать в качестве множителя при расчёте величины MTBF для гибридных интегральных схем функциональный коэффициент для схем (Circuit Function Factor). Например, при помещении линейной интегральной схемы в металлический корпус гибридной интегральной схемы коэффициент π_f принимается равным 5,8. Это значит, что интенсивность отказов компонента гибридной схемы в 5,8 раза больше, чем её базовая интенсивность отказов в соответствии с MIL-HDBK-217F. На основе опыта, приобретённого в течение длительного времени производства квалифицированных (по MIL-PRF-38534 и MIL-STD-883) гибридно-плёночных изделий, компания считает, что использование этого функционального коэффициента приводит к неверным результатам при расчёте величины MTBF для гибридных интегральных схем.

Согласно MIL-HDBK-217F, основной причиной повышенной интенсивности отказов для гибридных ИС является менее надёжное конструктивное уплотнение (герметизация). Специалисты компании считают, что это является необоснованным предположением при анализе гибридных ИС, произведённых на производственных мощностях, квалифицированных по Class H и Class K спецификации MIL-PRF-38534 (Performance Specification. Hybrid Microcircuits, General Specification For). Интенсивность отказов корпуса относится к двум отдельным случаям: нарушению герметизации корпуса и нарушению соединений в схеме (контакты). Общая длина периметра герметизации схемы в дискретном корпусе будет больше, чем у подобной схемы в гибридном корпусе. Наряду с меньшими проблемами герметизации, корпуса гибридных ИС также имеют свойственное им преимущество перед корпусами дискретных компонентов по числу требуемых соединений в схеме. Основное положение теории надёжности гласит: когда количество межсоединений возрастает, надёжность снижается. Число соединений, сделанных в гибридных ИС, примерно в 2 раза меньше числа межсоединений, сделанных в аналогичных схемах на дискретных компонентах. Схемы на дискретных компонентах требуют двух отдельных соединений для каждого компонента: одно – между полупроводниковым кристаллом и выводом корпуса и ещё одно – между выводом корпуса и платой схемы. Корпус гибридной ИС требует только одного соединения между полупроводниковым кристаллом и подложкой.

В связи с этим было принято решение использовать поправочный коэффициент при расчёте величины MTBF по справочнику MIL-HDBK-217F для всех квалифицированных гибридных ИС. Вследствие большой доли используемых в DC/DC-преобразователях линейных схем (при $f < 10$ МГц) применяется функциональный схемный коэффициент для линейных микросхем. Справочник MIL-HDBK-217F требует базовую интенсивность отказов линейных компонентов умножить на 5,8, и, следовательно, использовать поправочный схемный коэффициент 0,17241 (величина, обратная 5,8), чтобы компенсировать эту неправомерную отрицательную оценку. Как правило, это даёт в результате величину MTBF для гибрид-

ной ИС приблизительно на 50% больше, чем величина MTBF компонентов в дискретном корпусе. Эта разница является более обоснованной и точнее отражает приближённое к реальной интенсивности отказов значение, основанное на наработке оборудования за время эксплуатации в полевых условиях.

Выводы

Сравнение величин среднего времени наработки до отказа, рассчитанных с использованием изданий военного справочника MIL-HDBK-217E и MIL-HDBK-217F Notice 2, показывает существенное уменьшение рассчитанной величины. Детальное исследование созданной для редакции справочника 217F Notice 2 модели даёт серьёзный повод подвергнуть сомнению установленную величину некоторых коэффициентов λ и их применимость в модели. Для некоторых изменённых коэффициентов представлены рассчитанные интенсивности отказов и обоснования. Специалисты по надёжности компании IR полагают, что одно из первых четырёх условий, выбранное из таблицы, более объективно представ-

ляет точную модель для расчёта величины MTBF для гибридно-плёночных DC/DC-преобразователей напряжения. Что касается согласованности расчётов ревизии справочника Rev F с Rev E, по варианту расчёта 2, представленному в таблице, результаты получаются наиболее близкими.

Необходимо отметить, что MTBF – это характеристика надёжности оборудования, определяемая производителем. Разные производители могут использовать для своих расчётов различные базовые интенсивности отказов. Один производитель может точно следовать рекомендациям справочника MIL-HDBK-217 и применять опубликованные данные для компонентов коммерческого типа. Другой производитель может следовать формулам справочника, но использовать некоторые интенсивности отказов, определённые из собственного опыта работы со специфическими компонентами.

Потребитель должен понимать, при каких условиях была рассчитана величина MTBF, предоставляемая изготовителем [2].

В заключение необходимо отметить ещё одно обстоятельство, которое необходимо учитывать при расчёте эксплуатационной интенсивности отказов компонентов, руководствуясь справочником MIL-HDBK-217F: наличие ряда неточностей в моделях и их коэффициентах, а также практически полное отсутствие пояснений, о которых подробно рассказано в работе [4].

Литература

1. *Richard Miller*. An Examination of Changes Imposed by Revised Hybrid Models When Calculating MTBF Values using MIL-HDBK 217F, Notice 1&2. Application Note AN-1078. International Rectifier. 14/3/2005.
2. *Лукин А.В.* Надёжность источников вторичного электропитания. Практическая силовая электроника. 2001. №3.
3. *Рентюк В.* Вопросы надёжности для DC/DC-преобразователей. Компоненты и технологии. 2015. № 9, 12.
4. *Жаднов В., Полесский С., Якубов С.* Прогнозирование безотказности микросхем для военной и аэрокосмической электроники. Электронные компоненты. 2007. № 3.






НОВЫЕ МОЩНОСТИ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ



Кристаллы СВЧ-транзисторов GaN/SiC

- Диапазон частот: DC...6,0 ГГц
- Выходная мощность: 8, 15, 30, 40 Вт
- Типовое усиление: 15–17 дБ
- Рабочее напряжение: 28, 40, 50 В



Широкополосные GaN HEMT-транзисторы общего назначения

- Диапазон частот: L, S, C, X
- Выходная мощность: 800 Вт – L-диапазон, 180 Вт – S-диапазон, 6 Вт – X-диапазон
- Типовое усиление: 13–20 дБ
- Рабочее напряжение: 28, 40, 50 В



LDMOS-транзисторы

- Диапазон частот: 400...1400 МГц, 420...960 МГц, 700...2200 МГц, 1800...2000 МГц, 2000...2200 МГц, 2300...2400 МГц, 2500...2700 МГц
- Выходная мощность: до 600 Вт
- Типовое усиление: 16–30 дБ
- Рабочее напряжение: 28, 30, 48, 50 В



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

(495) 232-2522 ■ INFO@PROCHIP.RU ■ WWW.PROCHIP.RU