

НАДЁЖНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ЕЁ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА

Виктор Жданкин

Любое устройство может исправно работать не беспрерывно, а лишь в течение ограниченного срока, зависящего от условий эксплуатации, сложности аппаратуры и других факторов. Если при конструировании сложной радиоэлектронной аппаратуры не учитывать нарушения работоспособности и не принимать специальных мер для их уменьшения, то аппаратура будет выходить из строя достаточно часто.

Под надёжностью понимают способность изделия выполнять заданные функции в определённых условиях, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемого времени работы (наработки).

Разработке методов расчёта и обеспечения надёжности изделий посвящена самостоятельная отрасль науки — теория надёжности. Она устанавливает причинные связи в нарушениях работоспособности аппаратуры, позволяет устранить слабые звенья при создании аппаратуры, даёт прогноз надёжности вновь разрабатываемых приборов. Математические основы теории надёжности развиваются на базе теории вероятности и математической статистики.

Надёжность радиоэлектронной аппаратуры связана со случайными событиями и величинами, такими как отказ и время работы до отказа. Для количественного определения надёжности используется статистическая оценка качества прибора.

Для сложных систем и комплексов перед оценкой их надёжности четко дают определения того, что считать сбоем, а что считать отказом. При этом может учитываться тот факт, что в зависимости от функционального построения системы отказ каких-либо вспомогательных узлов и блоков может и не приводить к отказу системы в целом. Для простых устройств при расчете надёжности принято считать, что отказ любого входящего в него компонента ведёт к отказу всего устройства.

Хотя в данной статье делается акцент на вопросы надёжности силовой электроники, большинство материалов статьи справедливо и для другой радиоэлектронной аппаратуры.

Исходным для количественного определения параметров надёжности является распределение вероятности отказа во времени. Для оценки этого распределения какое-то количество изделий эксплуатируется длительное время и отмечаются моменты выхода из строя каждого из этих изделий. Если в первый момент времени работоспособны все 100% изделий, то к какому-то моменту времени (в принципе, может быть и при $t \rightarrow \infty$) все изделия выйдут из строя. Нормированная кривая, построенная на основании большого числа измерений, характеризует плотность вероятности отказа во времени $f(t)$. При помощи плотности вероятности $f(t)$ находят другие характеристики надёжности

элементов, а именно: вероятность отказа элементов в интервале времени от t до $t+\Delta t$, вероятность безотказной работы элемента в течение времени t , средний срок службы элементов, интенсивность отказов элементов, определяемую как доля выходящих из строя элементов в единицу времени по отношению к их количеству в момент t , частоту отказов элементов (определяется как доля выходящих из строя элементов в единицу времени по отношению к их начальному количеству), среднюю частоту отказов элементов.

Опыт показал, что для внезапных отказов обычно справедлив экспоненциальный закон распределения вероятности отказов. Можно показать, что плотность вероятности связана с интенсивностью отказов, следующим выражением

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

Параметр λ , имеющий размерность числа отказов в единицу времени, обычно и приводится как параметр надёжности элементов. Исходя из полученного выражения, определяются и остальные параметры надёжности:

средний срок службы элементов

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

и средняя частота отказов

$$f_{\text{ср}}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{t} (1 - e^{-\lambda t})$$

Предположив:

$$\lambda t \ll 1, e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t, \text{ получим } f_{\text{ср}}(t) \approx \lambda$$

Таким образом, в период работы после окончания процесса приработки и до начала физического износа средняя частота отказов равна интенсивности отказов.

Одним из факторов, определяющих общую надёжность устройства, является надёжность входящих в него элементов: сопротивлений, конденсаторов, диодов, транзисторов, трансформаторов, интегральных схем (ИС) и т. д. Выход из строя любого из этих элементов или изменение их параметров сверх определённых пределов приведёт к отказу всего изделия.

Для большинства элементов радиоэлектронной аппаратуры зависимость λ от времени имеет вид U-образной кривой (рис. 1).

В первый отрезок времени, называемый периодом приработки, выходят из строя элементы, имеющие грубые дефекты, не вскрытые контролем. После выявления этих элементов интенсивность отказов уменьшается и далее остаётся постоянной, наступает период нормальной работы. По мере износа элементов интенсивность отказов

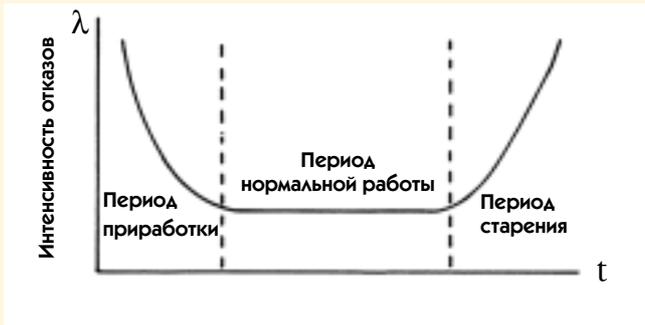


Рис. 1. Зависимость изменения интенсивности отказов от времени

вновь возрастает, начинается период старения элементов.

Количественное определение надёжности различных элементов связано с большой затратой времени и средств для получения и обработки статистических данных по их эксплуатации и испытаниям. Эксплуатационная интенсивность отказов ИС, выпускаемых в настоящее время, может составлять $\lambda=10^{-7}$ ч⁻¹, а совершенствование технологии и использование специальных методов отбраковки ИС позволяют довести этот показатель до $\lambda=10^{-8}-10^{-9}$ ч⁻¹. При таких значениях проведение статистических испытаний становится экономически и технически нецелесообразным вследствие непомерных трудностей получения сколько-нибудь достоверной количественной информации о надёжности.

В связи с этим для электронного оборудования приводятся, как правило, не экспериментальные, а расчетные параметры надёжности.

При определении общей надёжности аппаратуры, если отказ любого компонента приводит к неисправности прибора, все компоненты считаются включенными последовательно. Тогда при экспоненциальном законе распределения вероятности отказов $\lambda_c = \lambda_1 \times S_1 + \lambda_2 \times S_2 + \dots + \lambda_n \times S_n$, где n — число различных типов компонентов, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — средняя интенсивность отказов компонентов, а S_1, S_2, \dots, S_n — число элементов данного типа в приборе. Таким образом, интенсивность отказов изделия в целом представляет собой возрастающую функцию числа соединений и элементов, входящих в данную аппаратуру, а также интенсивности отказов элементов и соединений. На практике при расчёте надёжности по характеристикам элементов составляют перечень используемых элементов и определяют интенсивность отказов каждого вида элементов. Далее вводят коэффициенты, учитывающие влияние режима и условий работы.

Для учёта воздействий, определяемых средними условиями эксплуатации, обычно вводят коэффициент жёсткости, учитывающий степень сокращения среднего срока службы аппаратуры при воздействии неблагоприятных факторов внешней среды. Затем интенсивности отказов элементов суммируют и определяют необходимые характеристики: вероятность безотказной работы, вероятность возникновения любого количества отказов за данный период времени, среднее время безотказной работы и т. д.

Значение среднего времени между отказами (среднее время наработки на отказ — Mean Time Between Failures — MTBF) определяется следующим соотношением [1]:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Существует целый ряд стандартов для расчёта значения MTBF. Так, в телекоммуникационной индустрии используются такие стандарты, как BELLCORE TR-NWT-332 (обычно используется в США) и HRD4 (используется в Англии). Нарботка на отказ, рассчитанная в соответствии с этими стандартами, имеет большие значения, чем наработка на отказ, посчитанная в соответствии со стандартом MIL-HDBK-217F, который широко распространён на практике. Например, для преобразователя напряжения серии VXA30 (Computer Products) значения параметра наработки на отказ, рассчитанные согласно упомянутым стандартам, имеют следующие значения: MIL-HDBK-217F — 520000 часов, BELLCORE TR-NWT-332 — 750000 часов, HRD4 — 2500000 часов. Стандарт MIL-HDBK-217F накладывает жёсткие ограничения на компоненты невоенного назначения. Принятые интенсивности отказов некоторых из этих компонентов не совсем соответствуют реальным значениям. Например, трансформаторы и магнитные компоненты имеют очень низкую реальную интенсивность отказов, в то время как MIL-HDBK-217F предсказывает очень высокую. Кроме того, интенсивность отказов микросхем определяется стандартом как даже более высокая, чем у магнитных компонентов [2].

Количественно надёжность определяется как вероятность того, что устройство продолжит функционировать в течение определённого времени и вычисляется с помощью следующего экспоненциального уравнения:

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}}$$

Графическое представление зависимости надёжности от времени дано на рис. 2. Из этого уравнения может быть сделан ряд заключений:

- $R(t)$ является вероятностью со значением между 0 и 1;
- если силовой преобразователь отработал время, равное его MTBF, то вероятность его дальнейшей безотказной работы составит 0,37;
- устройство, отработавшее в течение времени, равного 10% от MTBF, будет иметь вероятность безотказной работы 0,9.

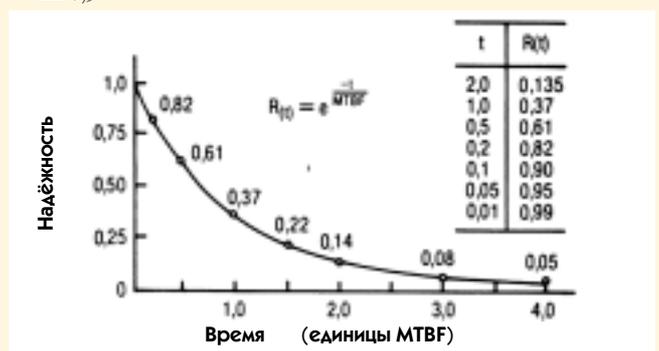


Рис. 2. График зависимости надёжности от времени

Небольшая таблица, приведенная на рис. 2, представляет дополнительные значения $R(t)$, которые не показаны на графике.

Для оценки показателей надёжности изделий наиболее часто применяются следующие параметры:

среднее время наработки на отказ, являющееся математическим ожиданием наработки изделия до первого отказа;

средний ресурс, являющийся математическим ожиданием суммарной наработки изделия от начала его эксплуата-

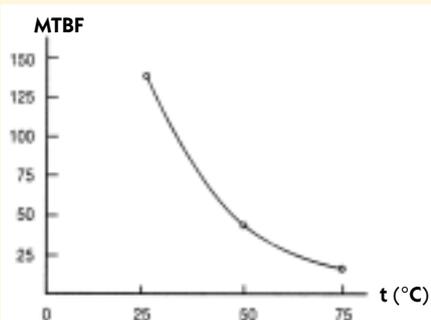


Рис. 3. Типичная зависимость среднего времени наработки на отказ (МТБФ) от температуры окружающего воздуха для источников питания

Условия эксплуатации	-55°C	-25°C	0°C	25°C	55°C	85°C	125°C
G_B	14 865 070	13 454 906	11 148 211	7 869 709	4 030 940	1 664 237	433 596
G_F	2 581 473	2 511 496	2 375 711	2 107 613	1 556 751	893 697	296 446
A_{IF}	1 934 543	1 879 286	1 772 287	1 562 474	1 138 718	642 805	209 818
A_{UF}	1 716 365	1 661 553	1 556 017	1 352 461	957 026	521 515	164 849
M_L	458 514	451 538	438 018	410 233	344 540	239 627	100 075

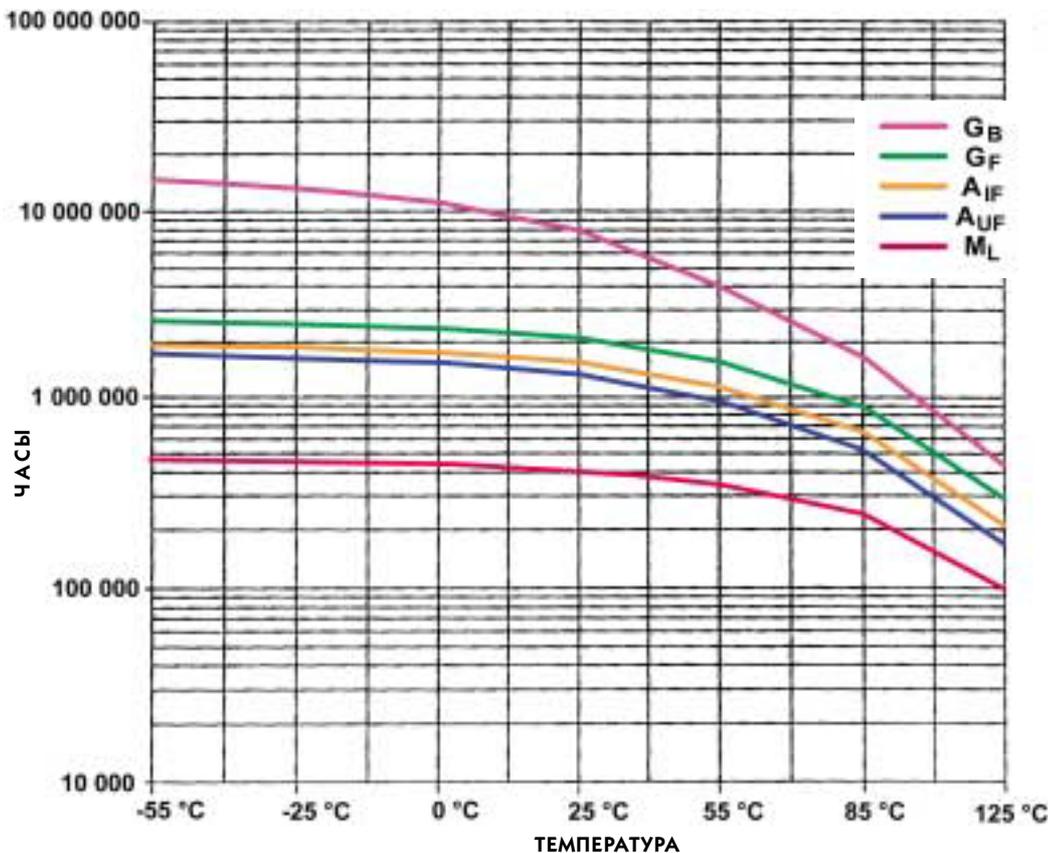


Рис. 4. Зависимость среднего времени наработки на отказ (МТБФ) от температуры и условий эксплуатации для фильтров FMD28-461 фирмы Interpoint

ции до перехода в состояние, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна;

средний срок сохраняемости, являющийся математическим ожиданием календарной продолжительности хранения и транспортирования изделия, по истечении которой изделие должно соответствовать требованиям по безотказности и долговечности, установленным нормативно-технической документацией на него;

средний срок службы, являющийся математическим ожиданием календарной продолжительности эксплуатации от начала до перехода в состояние, при котором дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна.

Для повышения надёжности источников вторичного электропитания (ИВЭП) очень важно обеспечить нормальный тепловой режим их функционирования, потому что, как правило, ИВЭП являются наиболее теплонапряжённой частью аппаратуры.

На рис. 3 приведён график зависимости МТБФ от температуры для гипотетического ИВЭП. Из графика видно, что повышение температуры способствует снижению надёжности. При 50°C параметр МТБФ имеет значение 5,1 лет, а при 75°C — 1,86 лет (в одном году 8766 часов).

Фирма Interpoint приводит для своих изделий время наработки на отказ, вычисленное в соответствии со стандартом MIL-HDBK-217F. Приводятся графики зависимости МТБФ от температуры и условий эксплуатации. В качестве примера приведены параметры МТБФ для фильтров FMD28-461 (рис. 4).

В таблице 1 приведены пояснения к условиям эксплуатации.

Коэффициент π_E является величиной, учитывающей условия эксплуатации аппаратуры и имеющей значения от 1,0 до 10,0.

Для построения отказоустойчивых систем электропитания необходимо применять полное дублирование конструкции и самодиагностику. Высокая надёжность системы означает, что только наиболее редкие, маловероятные отказы могут вывести систему из строя. Метод, используемый в высоконадёжных системах для уменьшения возможности появления отказов, заключается в N+1 резервировании (или N+2...N+M). Отказоустойчивые системы должны иметь, как мини-

мум, 2N-резервирование.

Резервирование значительно усложняет аппаратуру и увеличивает её стоимость, поэтому его следует применять, когда исчерпаны остальные, более простые способы повышения надёжности.

В качестве другой рекомендации по повышению надёжности разрабатываемой аппаратуры можно говорить об использовании унифицированных конструкций как наиболее отработанных.

Одновременное выполнение всех перечисленных требований легче всего обеспечить, если систему вторичного электропитания сделать децентрализованной. ●

Таблица 1. Обозначение и описание условий эксплуатации

Окружающая среда	Символ \mathcal{L}_E	Эквивалент MIL-HDBK-217E Извещение 1 Символ \mathcal{L}_E	Описание
Земля, мягкий климат	G_B	G_B G_{MS}	Стационарная, контролируемая температура и влажность окружающей среды, возможен текущий ремонт; включает лабораторные приборы и испытательное оборудование, медицинское электронное оборудование, научные и коммерческие вычислительные комплексы, ракетное и вспомогательное оборудование в наземных шахтных пусковых установках.
Земля стационарная	G_F	G_F	Умеренно регулируемые факторы окружающей обстановки, например установка в стационарные стойки с достаточным воздушным охлаждением и возможная установка в неотапливаемых помещениях; включает в себя радиолокационное оборудование управления воздушным движением и связанное оборудование.
Земля мобильная	G_M	G_M M_P	Оборудование, установленное на колёсные или гусеничные подвижные средства, и носимое оборудование; включает оборудование тактических ракет наземной поддержки, тактические системы управления огнём, носимое связанное оборудование, лазерные прицелы и полигонные видеокамеры.
Морские укрытые	N_S	N_S N_{SB}	Включает условия эксплуатации укрытого оборудования или расположенного ниже палубы на надводных кораблях и оборудование, установленное на подводных лодках.
Морские неукрытые	N_U	N_U N_{UU} N_H	Незащищенное оборудование, перевозимое на надводных кораблях, подвергающееся воздействию погодных условий, и оборудование, подвергающееся воздействию солёной воды. Включает в себя оборудование гидролокаторов и оборудование, установленное на судах на подводных крыльях.
Перевозка по воздуху, обитаемые зоны, транспортная авиация	A_{IC}	A_{IC} A_{IT} A_{IB}	Типичные условия в грузовом отделении, которое может быть занято экипажем самолёта. Условия предельного давления, температуры, удара и вибрации являются минимальными. В качестве примеров можно привести самолёты дальней авиации, такие как С130, С5, В52 и С141. Эта категория относится также к обитаемым зонам в самолётах малого класса, таких как Т38.
Перевозка по воздуху, обитаемые зоны, истребитель	A_{IF}	A_{IF} A_{IA}	Такие, как A_{IC} , но установленные на самолётах с высокими лётными данными (истребители и штурмовики). Примеры включают F15, F16, F111, F/A18 и А10.
Перевозка по воздуху, необитаемые зоны, транспортная авиация	A_{UC}	A_{UC} A_{UT} A_{UB}	Зоны с нерегулируемыми условиями окружающей среды, которые не могут быть заняты экипажем во время полёта. Предельное давление, температура, удар могут быть достаточно высокими. Примеры включают в себя необитаемые отсеки самолётов дальней авиации, таких как С130, С5, В52 и С141. Эта категория также применяется к необитаемым отсекам самолётов малого класса с низкими лётными характеристиками, например Т38.
Перевозка по воздуху, необитаемые зоны, истребитель	A_{UF}	A_{UF} A_{UA}	Такие же, как и A_{UC} , но для оборудования, установленного на самолётах с высокими лётными характеристиками (истребители и штурмовики). Примеры включают F15, F16, F111 и А10.
Перевозка по воздуху, аппараты, снабженные вращательными лопастями	A_{RW}	A_{RW}	Оборудование, установленное на вертолётах. Применяется к оборудованию, установленному как снаружи, так и внутри, такому как лазерные прицелы, системы управления огнём и связанная аппаратура.
Космос, полёт	S_F	S_F	Околоземная орбита. Условия, сходные с мягкими земными условиями. У летательного аппарата выключен силовой двигатель, аппарат не входит в плотные слои атмосферы; включает спутники и космические летательные аппараты многократного использования.
Ракета, полёт	M_F	M_{FF} M_{FA}	Условия относятся к ракетам, у которых работает силовой двигатель, крылатым ракетам и ракетам, находящимся в полёте по баллистической траектории.
Ракета, момент пуска	M_L	M_L U_{SL}	Суровые условия, связанные с пуском ракеты (авиационной, воздушной, наземной или морской). Условия, возникающие на космическом корабле, форсированно выводимом на орбиту, и на летательном аппарате при входе в плотные слои атмосферы и приземлении на парашюте. Также применяется к твёрдотопливным ракетным двигателям, силовым установкам, обеспечивающим полёт, к условиям, возникающим при пуске торпеды и ракеты с подводных лодок.
Артиллерийское орудие, выстрел	C_L	C_L	Чрезвычайно суровые условия относятся к стреляющему 155 мм снарядами артиллерийскому орудью и 5-дюймовому миномету. Условия применяются к снарядам от момента выстрела до поражения цели.

Литература

1. The principles of power conversion. – GB: Computer Products, 1991.
2. Military Standartization Handbook, MIL-HDBK-217F.