

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ПРИ РАЗРАБОТКЕ РВ, РВС И СЛОЖНЫХ РЭС МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РЭС ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Жаднов В.В.

Совокупность методов, позволяющих реализовать мероприятия ПОНр на ранних этапах разработки РЭС (техническое предложение (ТП) и эскизное проектирование (ЭП)), представляет собой методологию обеспечения надежности при проектировании. Очевидно, что на этих этапах основными являются методы, позволяющие оценить показатели надежности путем вероятностного моделирования на ЭВМ. В настоящее время для этих целей на отечественных предприятиях-разработчиках РЭС наибольшее распространение получили следующие программные средства (ПС): АСРН (22 ЦНИИ МО РФ) [1], *RELEX (Relaxsoftware Corp.)* [2] и программный комплекс (ПК) АСОНИКА-К (КР *ASKSoft*, МИЭМ) [3], наряду с которыми на ряде предприятий применяются и ПС собственной разработки.

В АСРН реализованы модели и методы расчета надежности изделий электронной техники (ИЭТ) и электронных модулей, приведенные в справочнике «Надежность ЭРИ», а в *RELEX* – методы расчета надежности изделий, приведенные в американских военных стандартах в области надежности (в т.ч. *MIL HDBK-217*), а также в справочниках по характеристикам надежности ИЭТ ряда других стран (*TR 322 – Bellcore Issue 6*, *SR 322 – Telcordia 2001*, *RDF 95 – French Telecom*, *UTEC 80810 (CNET 2000)*, *HRD – British Telecom*, *GJB 299 – Chinese Standard*, *IRPH 93 – Italtel*, *ALCATEL*, *RADC 85-91*, *NPRD – 95*, *NSWC – 98* и др.). В ПК АСОНИКА-К, наряду с моделями и методами, приведенными в справочнике «Надежность ЭРИ» и *MIL HDBK-217* введен ряд специально разработанных моделей и методов их решения, в совокупности представляющих собой методологию обеспечения надежности РЭС при проектировании. Краткая характеристика этих моделей и методов приведена ниже. При разработке моделей и макромоделей составных частей (СЧ) и РЭС в целом была решена задача их унификации, в т.ч. и унификации с моделями, приведенными в официальном документе МО РФ – справочнике «Надежность ЭРИ». Это позволило широко использовать известные методы и уменьшить общее число методов анализа выходных характеристик (показателей надежности) этих моделей.

Метод расчета показателей надежности РЭС. Для расчета характеристик моделей отказов (показателей надежности) в ПК АСОНИКА-К реализован оригинальный метод [4], представляющий собой комбинацию аналитических и численных методов, что позволяет сочетать низкую трудоемкость и высокую информативность первых с высокой точностью вторых.

Для анализа характеристик надежности РЭС и (или) СЧ, схема расчета надежности (СРН) которых представляет собой последовательное соединение элементов, применяется прямой аналитический метод, основанный на использовании интеграла свертки распределений. Для других типов СРН (ветвящиеся структуры, резервирование СЧ и др.) – метод статистических испытаний. Для анализа характеристик квазидетерминированных функций (КДФ) применяется метод, основанный на использовании метода вероятностных моментов (аналитический метод) для расчетов моментов отклонений СЧ и РЭС в целом, и метод статистических испытаний (численный метод) для расчетов моментов отклонений параметров вероятностных моделей ИЭТ и показателей надежности РЭС.

Метод расчета показателей надежности РЭС по постепенным отказам. В современных РЭС, наряду с цифровыми СЧ, по-прежнему используются и аналоговые, надежность которых существенно зависит от постепенных отказов. Многочисленные исследования (Абрамова А.О., Куликова В.Н., Фомина А.В. и др., в т.ч. и автора статьи) показывают, что традиционные модели

отказов (функции распределения наработки) мало пригодны для моделирования постепенных отказов РЭС. Попытки аппроксимировать случайные процессы изменения электрических параметров ИЭТ и выходных характеристик РЭС процессами веерного типа (Дружинин Г.В., Батуев В.П.) или Марковскими процессами (в т.ч. диффузионного типа – Стрельников В.П.) оказались малосостоятельными, т.к. реальные процессы изменения параметров ИЭТ и выходных характеристик РЭС являются случайными, нестационарными, непрерывными, нелинейными, сильно коррелированными между собой функциями времени и внешних воздействующих факторов (ВВФ). Поэтому в ПК АСОНИКА-К был включен метод расчёта надёжности РЭС по постепенным отказам, в основе которого лежит аппроксимация случайных процессов изменения параметров ИЭТ и выходных характеристик СЧ и РЭС квазидетерминированными функциями (детерминированными функциями со случайными коэффициентами) вида:

$$y_j(Z_s) = y_{j0} \cdot \prod_{l=1}^L \{1 + \delta y_j(z_l^s)\}, \quad (1)$$

где: $y_j(Z_s)$ – значение j -ой выходной характеристики y при комплексном воздействии ВВФ, заданных вектором Z_s ;

$Z_s = \{z_1^s, z_2^s, \dots, z_L^s\}$ – вектор s -го сочетания значений ВВФ;

z_l^s – значение l -го фактора, соответствующего s -му сочетанию;

y_{j0} – расчетное значение j -ой выходной характеристики y (при значениях ВВФ, соответствующим нормальным условиям);

L – общее число ВВФ, действующих на РЭС;

$\delta y_j(z_l^s)$ – относительное отклонение j -ой выходной характеристики y при значении l -го фактора, соответствующего s -му сочетанию.

Для расчёта моментов случайных параметров $\delta y_j(z_l^s)$ (1) в ПК АСОНИКА-К используется метод, основанный на использовании комбинации метода вероятностных моментов и метода статистических испытаний.

Метод макроmodellирования СЧ. Применение приведенных выше моделей и методов, в принципе, позволяет провести исследование надёжности РЭС на ранних этапах проектирования, но могут возникнуть проблемы с реализацией концепции информационной поддержки ПОНр [4], а именно, положения о непрерывной поддержке самого процесса расчёта надёжности. Это может быть обусловлено большими объемами вычислительных затрат и проявляться как длительное «зависание» даже компьютеров нового поколения на базе процессоров *Intel Pentium-IV*, не говоря уже об устаревших моделях ЭВМ. Вместе с тем, анализ современных РЭС показывает, что в их состав может входить большое количество СЧ одного типоразмера. В этом случае существенное снижение объема вычислительных затрат может быть достигнуто за счет применения методов макроmodellирования.

Для реализации этой возможности были разработаны макроmodelи эксплуатационных характеристик надёжности СЧ [4]. Например, для эксплуатационной интенсивности отказов λ_3 (параметр E -модели), макроmodel имеет вид:

$$\lambda_3 = \lambda_0 \cdot K_3 \cdot (a_1 + a_2 \cdot K_H) \cdot \exp(b_1 + b_2 \cdot T), \quad (2)$$

где: λ_0 – базовая интенсивность отказов СЧ;

K_3 – коэффициент, зависящий от группы аппаратуры по ГОСТ Р В 20.39.301-98;

a_1, a_2 – параметры зависимости от K_H ;

K_H – коэффициент электрической нагрузки СЧ;

b_1, b_2 – параметры зависимости от T ;

T – температура среды, окружающей СЧ.

Как следует из (2), точность макромоделей определяется шагом дискретизации коэффициента нагрузки, температуры и погрешностями аппроксимации их зависимостей. Однако, очевидно, что применение таких макромоделей СЧ в расчётах надёжности РЭС в итоге даёт значительно меньшую погрешность, чем в случае, когда используется общепринятое допущение о том, что для СЧ одного типоразмера $\lambda_s \approx const$ (не зависит ни от условий применения, ни от нагрузки).

Метод идентификации параметров моделей отказов ИЭТ по справочным данным. В соответствии с рекомендациями ГОСТ-27.005-97 для расчёта, оценки и контроля показателей надёжности объектов (в т.ч. ИЭТ) предпочтительными моделями отказов (математическими моделями) являются следующие функции распределения наработки: экспоненциальное распределение (E), распределение Вейбулла (W), α -распределение (α), DM -распределение (DM) и DN -распределение (DN).

Однако, только для E -модели издаются официальные данные о характеристиках надёжности ИЭТ, что позволяет провести расчёт надёжности РЭС на ранних этапах проектирования. Что же касается других моделей, то их использование требует экспериментальной статистики отказов, которая отсутствует на этапах ТП и ЭП. В то же время, как показывают результаты исследований, E -модель не всегда является достаточно адекватной. Так, для ИЭТ, применяемых в ЭВС, более точные результаты даёт DN -модель (Стрельников В.П.), в изделиях автоэлектроники - W -модель (Старостин А.К.), для ряда классов ИЭТ - α -модель (Дружинин Г.В.) и т.д. Поэтому в ПК АСОНИКА-К был включен метод идентификации параметров моделей отказов по справочным данным, что позволяет проводить расчёты надёжности РЭС, СЧ которой (в т.ч. и ИЭТ) могут иметь не только одинаковые (отличные от E -модели), но и различные модели отказов. Очевидно, что для идентификации параметров моделей отказов, которые представляют собой одно- и двухпараметрические интегральные функции, наиболее подходящими являются методы математического программирования (алгоритмические), так как аналитические методы применимы лишь для простейших моделей (например, для E -модели).

Исходя из этого, для идентификации параметров моделей отказов ИЭТ была выбрана группа методов многомерной, условной, глобальной, нелинейной, непрерывной оптимизации нулевого порядка. Выбор этой группы обусловлен тем, что методы, которые в нее входят, достаточно просты и легко формализуются (применение, например, группы градиентных методов привело бы к значительным трудностям, связанным с расчетом производных, например, от функции DN -распределения).

Созданная в итоге реализация метода оптимизации [4] представляет собой модифицированный метод регулярного поиска с осуществлением последовательного перебора значений, так как функции распределения времени наработки до отказа ИЭТ является монотонно возрастающими.

Метод идентификации параметров математических моделей эксплуатационной интенсивности отказов ИЭТ зарубежного производства для режима ожидания (хранения). В современных РЭС, разрабатываемых на российских предприятиях, широко применяются ИЭТ зарубежного производства. Это создаст значительные трудности при расчете надёжности РЭС, которые в эксплуатации основную часть времени находятся в режиме ожидания (хранения) в обесточенном состоянии с периодическим контролем работоспособности. В соответствии с рекомендациями, приведенными в справочнике «Надёжность ЭРИ», для таких РЭС следует рассчитывать интенсивность отказов ИЭТ по моделям, которые отличаются от моделей эксплуатационной интенсивности отказов. Что же касается ИЭТ зарубежного производства (или их отечественных аналогов), то для них такие модели (в том числе, и численные значения коэффициентов) в нормативно-технической документации не приводятся, причем не только в зарубежной (см., например, *MIL HDBK-217*), но даже в отечественном справочнике «Надёжность зарубежных аналогов».

Для решения этой проблемы был разработан метод идентификации характеристик надежности ИЭТ для режима ожидания (хранения). Метод позволяет синтезировать математическую модель интенсивности отказов ИЭТ в режиме ожидания (хранения) в аналитическом виде и идентифицировать численные значения ее коэффициентов.

Синтез математической модели интенсивности отказов ИЭТ в режиме ожидания (хранения) основан на использовании принципа двойственности. Математическая модель интенсивности отказов ЭРИ зарубежного производства в режиме ожидания (хранения) в общем виде может быть представлена как:

$$\lambda_{px} = \lambda_{xb}(\lambda_b) \prod_{i=1}^n \pi_i, \quad (3)$$

где: λ_{xb} – базовая интенсивность отказов типа (группы) ЭРИ в режиме ожидания (хранения); π_i – коэффициенты модели; n – количество коэффициентов.

Например, для класса ИЭТ «Resisters» по MIL HDBK-217 (3) принимает следующий вид:

$$\lambda_{px} = \lambda_b \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \cdot \pi_T \cdot \pi_X, \quad (4)$$

где значение коэффициента хранения π_X вычисляется по значениям K_{xi} на основе соотношения:

$$\pi_X = \frac{\sum_{i=1}^N K_{xi}}{N}, \quad (5)$$

где N – количество групп в классе «Резисторы» по классификации справочника «Надежность ЭРИ»;

K_{xi} – коэффициент хранения для i -й группы резисторов.

Аналогично могут быть получены и математические модели, и численные значения коэффициентов отечественных аналогов зарубежных ИЭТ. Метод идентификации численных значений коэффициентов математических моделей интенсивности отказов ИЭТ в режиме ожидания (хранения) программно реализован в ПК АСОНИКА-К и включен в состав интерфейса администратора справочной части базы данных.

Метод расчёта коэффициента, зависящего от группы аппаратуры по ГОСТ Р В 20.39.301-98. Это особенно важно для механических воздействий, реальные (рабочие) значения которых в месте установки ИЭТ могут отличаться от значений входных воздействий на РЭС в десятки и сотни раз (например, амплитуда ускорений при воздействии гармонической вибрации). Модель позволяет получить значение коэффициента, зависящего от группы аппаратуры (от ВВФ по ГОСТ Р В 20.39.301-98 (K_3)) или от внешней среды (Environment) по MIL HDBK-217 (π_E)) для значений рабочих характеристик каждого ВВФ в месте установки ИЭТ, при условии, что известен процент отказов по каждому ВВФ. Например, для K_3 модель имеет вид:

$$K_3 = \ln \left\{ 1 - \sum_{i=1}^2 \left[(n_i / 100) \cdot \left[\sum_{j=1}^{J_i} (m_{i,j} / 100) \cdot [1 - \exp \{ -K_3(z_{i,j}^{pab}) \}] \right] \right] \right\}, \quad (6)$$

где: n_i – процент отказов по i -му виду ВВФ;

i – номер вида ВВФ (механические воздействия – $i = 1$; климатические – $i = 2$);

$m_{i,j}$ – процент отказов по j -му типу ВВФ i -го вида;

j – номер типа ВВФ ($j = 1, J_i$);

J_i – количество типов ВВФ i -го вида; $K_3(z_{i,j}^{pab}) = \min K_3(Z_{i,j}^k)$, при условии, что величина $z_{i,j}^{pab}$ принадлежит области $Z_{i,j}^k$, где:

z_{ij}^{pab} – рабочее (расчетное) значение j -го ВВФ i -го вида, действующего на данное ИЭТ;

Z_{ij}^k – область изменения j -го ВВФ i -го вида, действующего в месте установки РЭС (заданная для k -ой группы в ГОСТ РВ 20.39.301-98).

Важно отметить, что использование (6) позволяет проводить расчеты РЭС, содержащей ИЭТ отечественного и зарубежного производства, несмотря на то, что ни классификация аппаратуры, ни численные значения ВВФ в справочниках «Надежность ЭРИ» и *MIL HDBK-217* не совпадают, т.к. в этом случае значение $K_3(\tau_E)$ определяется не по вектору ВВФ, действующему на РЭС, а по вектору ВВФ, действующему в месте установки ИЭТ.

Использование этой модели в расчетах эксплуатационной интенсивности отказов ИЭТ в итоге дает значительно меньшую погрешность, чем в случае, когда используется общепринятое допущение о том, что в РЭС данной группы для всех ИЭТ одного типоразмера $K_3 \approx const$ (значения рабочих значений ВВФ в месте установки ИЭТ принимаются равными значениям ВВФ в месте установки РЭС), или о том, что характеристики ВВФ по ГОСТ Р В 20.39.301-98 соответствуют характеристикам внешней среды, например, по *MIL HDBK-217*.

Метод анализа результатов расчетов. Для практической реализации возможности управления надежностью РЭС значение одних только численных значений показателей надежности является недостаточным, так как способы изменения надежности могут быть различны (изменение режимов работы ИЭТ, введение избыточности и др.). Поэтому для обоснования выбора конкретного способа повышения надежности проектируемых РЭС был разработан интерактивный метод анализа результатов расчета [4], который позволяет пользователю получить количественную информацию следующего характера:

- достигнутый уровень показателей надежности как РЭС в целом, так и его компонентов (групп, СЧ и ИЭТ);

- рекомендуемый вид и параметры резервирования как РЭС в целом, так и его компонентов (групп, СЧ и ИЭТ).

Кроме того, для ИЭТ определяется информация следующего характера:

- максимально допустимые значения рабочей температуры и коэффициента электрической нагрузки и (или) рабочих токов, напряжений, мощностей;

- рекомендуемый вид приемки (для отечественных) и уровень качества для зарубежных ИЭТ;

- максимально-допустимые значения внешних воздействующих факторов (климатических и механических).

В основе метода лежит аппарат теории чувствительности, который используется для вычисления оценок степени влияния различных факторов (режимов работы, собственной надежности ИЭТ и др.). Разработанный метод программно реализован и включен в состав Системы анализа результатов (САР) ПК АСОНИКА-К. Применение САР позволяет пользователю найти типонаименования ИЭТ, требуемые значения электрических и тепловых режимов работы, значение внешних воздействующих факторов, тип и параметры резервирования и т.д., при которых обеспечиваются требования ТЗ (ЧТЗ) по надежности, т.е. наполнить конкретным содержанием рекомендации общего характера (например, вместо рекомендации «Снизить рабочее напряжение конденсатора С1» выдвинуть требование «Обеспечить рабочее напряжение конденсатора С1 не выше 5 В»).

Естественно, что рассмотренные выше методы составляют лишь часть общей методологии обеспечения надежности при проектировании, которая, наряду с классическими методами теории надежности, включает в себя методы моделирования физических процессов, протекающих в РЭС (электрических, тепловых, механических и др.), методы топологического проектирования (компоновки, размещения, трассировки и т.п.), т.е. весь спектр методов, в настоящее время применяемых при автоматизированном проектировании РЭС.

Литература

1. РД В 319.01.20-98. Руководящий методический документ. Положение о справочнике «Надежность электrorазделов».
2. Викторова, В. С. *RELEX* – программа анализа надежности, безопасности, рисков / В. С. Викторова, Х. Кунтшер, Б. П. Петрухин и др. // Надежность: Науч.-техн. журн. – 2003. – № 4 (7) – 2003. – с. 42–64.
3. Жаднов, В. В. Новые возможности программного комплекса АСОНИКА-К / В. В. Жаднов, И. В. Жаднов, С. П. Замаев и др. // *CHIP NEWS: Инженерная микроэлектроника*: Науч.-техн. журн. № 10 (83) – 2003. – с. 52-55.
4. Жаднов, В. В. Автоматизация проектных исследований надежности радиоэлектронной аппаратуры: Научное издание / В. В. Жаднов, Ю. Н. Кофанов, Н. В. Малютин и др. – М.: Радио и связь, 2003. – 156 с.

УДК 621.396.6.049.75 (075)

ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ И ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОСТАТОЧНОСТИ ЗАПАСОВ В КОМПЛЕКТАХ ЗИП ДЛЯ РЭС

Полесский С.Н., Жаднов В.В.

Для обеспечения высокой эксплуатационной надежности радиоэлектронных средств (РЭС) придается система обеспечения работоспособности, которая включает в себя диагностические и ремонтные средства, комплекты запасных элементов, средства доставки запасных элементов и др. Совокупность всех этих запасов конструктивных элементов, входящих в систему обеспечения работоспособности РЭС, назовем системой ЗИП. Возможная недостача элементов в системах ЗИП сказывается на среднем времени замены отказавшего элемента на исправный, что при ограничении объема ЗИП может существенно повлиять на показатели надежности РЭС, и это нельзя не учитывать. При этом возникает задача проектирования системы ЗИП, обеспечивающей заданный уровень надежности РЭС при минимальных затратах или обратная ей задача.

Если РЭС в ходе эксплуатации будет использовать систему ЗИП, то необходимо оценивать показатели надежности не только самого изделия, а уже пары «изделие- система ЗИП». В настоящее время практика проектирования надежных изделий подразумевает раздельное проектирование как самого изделия, так и его системы ЗИП. Поэтому для уточнения расчетов необходимо вводить поправку на показатели надежности РЭС, одним из которых является показатель достаточности системы ЗИП. Этот показатель характеризует снижение надежности пары «изделие- система ЗИП», по сравнению с использованием системы ЗИП с неограниченным запасом.

Номенклатура показателей достаточности включает в себя два показателя:
- среднее время задержки в исполнении заявки на запасной элемент (задержка вызывается возможным отсутствием необходимого запасного элемента в системе ЗИП);
- коэффициент готовности системы ЗИП (средняя по времени вероятность того, что система ЗИП не находится в состоянии отказа).

Кроме этих показателей используется показатель суммарные затраты (СЗ) на элементы ЗИП или просто затраты.

На практике используется несколько вариантов структур систем ЗИП (см. рис. 1, 2 и 3), рекомендуемые [1]. Выбор структуры зависит от специфики эксплуатации, назначения и вида аппаратуры. Использование только одного из этих трех видов структур систем ЗИП не позволяет решить задачу оптимального проектирования таких систем (см. выше). Пакет