

О МЕТОДАХ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Кравченко Е.В.

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

e-mail: kevatp@tpu.ru

Мировым трендом в области электроэнергетики развитых стран является использование силовых полупроводниковых приборов (СПП) в различных областях применения (рис.1). Около 70% всей вырабатываемой электроэнергии преобразуется с применением полупроводниковых устройств [1]. Для России доля, приходящаяся на полупроводниковые преобразователи, составляет примерно 30% вырабатываемой электроэнергии. Увеличение количества силовых полупроводниковых устройств в различных сферах жизнедеятельности, безусловно, увеличит энергоэффективность, а вместе с тем, при достижении мирового показателя, позволит сэкономить 12-15% всей вырабатываемой в России электроэнергии.



Рис.1 Сфера применения СПП.

Современные СПП формально можно разделить на две группы в зависимости от мощности. К первой группе устройств, применяемых преимущественно для преобразования очень больших мощностей, относят диоды и тиристоры. Вторую группу приборов, использующихся в диапазоне средних и малых мощностей, представляют полевые (MOSFET – metal-oxide-semiconductor field effect transistor) и биполярно-полевые транзисторы (IGBT – Insulated-gate bipolar transistor).

Разработка силовых полупроводниковых изделий сопряжена со значительными временными и ресурсными затратами, с одной стороны. С другой стороны, такие приборы эксплуатируются в достаточно узком диапазоне внешних рабочих температур, например, силовые тиристоры от 0⁰ до +40⁰С и с жесткими

требованиями в плане надежности. Также, учитывая большой срок окупаемости энергетических объектов, существует потребность прогнозирования надежности СПП за пределами срока службы изделий [2]. Поэтому возникает необходимость оценки надежности полупроводниковых устройств силовой электротехники, как на стадии разработки изделий, так и в течение всего срока эксплуатации и за его пределами.

Методы прогнозирования. Стандарт [3] определяет три класса методов прогнозирования надежности объектов:

- методы эвристического прогнозирования (экспертной оценки);
- методы прогнозирования по статистическим моделям;
- комбинированные методы.

Объединяющей основой перечисленных методов оценки показателей надежности является статистика. Для метода эвристического прогнозирования это статистическая обработка независимых оценок (индивидуальных прогнозов) показателей надежности. Комбинированный метод включает в себя методы эвристического прогнозирования и прогнозирования по статистическим моделям. В последнем методе, модели для прогнозирования строят по данным о показателях надежности и параметрах объектов-аналогов с использованием известных статистических методов (многофакторного регрессионного или факторного анализа, методов статистической классификации и распознавания образов).

Методы прогнозирования надежности, основанные на статистическом анализе, имеют ряд существенных недостатков. К таким ограничениям относят нормы и условия выборки приборов, отправляемые на испытания. Вероятное отсутствие объектов-аналогов при разработке, например, новых СПП для определенной отрасли применения. Допущение о стационарности режимов работы самих устройств и условий эксплуатации, например, градиенты температур внутри электрорадиоизделий (ЭРИ) могут достигать 30⁰ и более градусов даже для относительно мало мощных устройств (единицы Ватт) [4]. Поэтому, методы математического моделирования, основанные на физике отказов (PoF – physics of failure), учитывающие такие важные факторы как, например, внутреннюю неоднородность тепловых полей, нестационарность условий эксплуатации СПП и

режимов работы самих приборов, а также деградационные изменения структуры материалов под действием совокупного влияния внешних и внутренних факторов, имеют под собой серьезное основание.

Прогнозирование показателей надежности, а именно интенсивностей отказов, серийно выпускаемых и новых электронных и электротехнических элементов, к которым относятся и силовые полупроводниковые изделия, согласно [3], может проводиться при помощи соответствующих методик, содержащихся в американском военном справочнике MIL-HDBK-217 и отечественном справочнике по надежности электрорадиоизделий. Однако, в рекомендуемых стандартом методиках – математических моделях прогнозирования показателей надежности, существуют отличия, как в количестве коэффициентов модели и базовых интенсивностях отказов отдельных типов СПП, так и в значениях коэффициентов, а также подходах и характеристиках самих коэффициентов. Поэтому, представляется интерес оценки соответствия двух методик с целью определения возможности использования их в качестве составляющей концепции PDfR (PDfR – probabilistic design for reliability) [5]. Смысл которой заключается в эффективном управлении затратами на разработку устройств электронной техники и сроком выхода на рынок того или иного изделия.

Постановка задачи. В качестве базового элемента при прогнозировании показателя надежности, как класс устройств, был выбран силовой низкочастотный диод с температурой перехода $T_{пер}=140^{\circ}\text{C}$.

Математическая модель оценки надежности по отечественному справочнику «Надежность ЭРИ»:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma} \cdot K_p \cdot K_{\phi} \cdot K_k \cdot K_{\Sigma}, \quad (1)$$

где: λ_{Σ} – базовая интенсивность отказов соответствующих типов силовых приборов;

K_p – коэффициент режима, зависит от электрической нагрузки и температуры;

K_{ϕ} – коэффициент функциональной специфики режима работы прибора;

K_k – коэффициент уровня качества прибора;

K_{Σ} – коэффициент жесткости условий эксплуатации.

Математическая модель оценки надежности по военному справочнику MIL-HDBK-217:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma} \cdot \pi_T \cdot \pi_S \cdot \pi_C \cdot \pi_Q \cdot \pi_E, \quad (2)$$

где: λ_{Σ} – базовая интенсивность отказов соответствующих типов силовых приборов;

π_T – коэффициент режима, зависит от температуры;

π_S – коэффициент режима, зависит от электрической нагрузки;

π_C – коэффициент, зависит от конструкции контакта;

π_Q – коэффициент уровня качества прибора;

π_E – коэффициент условий эксплуатации.

Необходимо отметить, что оценка надежности СПП по моделям (1) и (2) проводилась для типичного режима работы прибора и условий эксплуатации (окружающая температура $T=25-60^{\circ}\text{C}$). На рис. 2 представлены результаты численного моделирования показателя надежности (интенсивности отказов) по двум методикам.

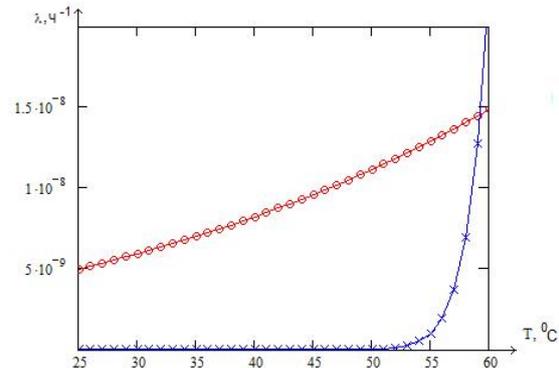


Рис. 2. Интенсивности отказов мощных полупроводниковых диодов при различных температурах окружающей среды. (○-модель (2) по MIL-HDBK-217 ; ×-модель (1) по справочнику «Надежность ЭРИ»)

Заключение. Использование методов POF при прогнозировании надежности СПП создает предпосылки для минимизации количества приемо-сдаточных испытаний, а в последующем, методы, основанные на физике отказов, могут стать важной составляющей концепции PDfR..

Однако, важно отметить, что базовые интенсивности отказов СПП приведены для температуры $+25^{\circ}\text{C}$ и не учитывают пространственную неоднородность тепловых полей, как внутри приборов так и за его пределами.

Список литературы

1. И.В. Грехов. Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника. // Вестник российской академии наук, 2008, том 78, № 2, с. 106-131.
2. Семёнов Г.М., Сухов А.В. О надёжности эксплуатации силовых полупроводниковых приборов за пределами срока службы в преобразовательных агрегатах // Электротехника. 2006. № 10. С. 9-13.
3. ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
4. Кузнецов Г.В., Белозерцев А.В. Численное моделирование пространственного поля температур в силовом транзисторе // Радиотехника. 2006. № 3. С. 62-66.
5. E. Suhir When adequate and predictable reliability is imperative // Microelectronics Reliability. 2012. № 52. P. 2342-2346.