

# Оценка наработки до отказа функциональных узлов электронных средств на основе виртуальных испытаний

**С.Х. Фам**, МИРЭА – Российский технологический университет, Институт радиоэлектроники и информатики, аспирант; phamxuanhanh161@gmail.com

**А.В. Долматов**, МИРЭА, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, к.т.н.; dolmatov@mirea.ru

**С.У. Увайсов**, МИРЭА, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, профессор, д.т.н.; uvajsov@mirea.ru

**Р.М. Увайсов**, МИРЭА, Институт радиоэлектроники и информатики, аспирант; ruslan27398@yandex.ru

**Д.Х. Нгуен**, МИРЭА, Институт радиоэлектроники и информатики, аспирант; duchai09011997@gmail.com

УДК 621.38

DOI: 10.34832/ELSV.2026.77.3.009

**Аннотация.** Целью исследования является повышение эффективности проектирования и испытаний функциональных узлов электронных средств за счет прогнозирования наработки до отказа с учетом фактического температурного поля конструкции электронных средств, а также технологического разброса и деградации параметров электронных компонентов. В основе предложенного метода лежат виртуальные испытания электронных средств с применением математических моделей электрических и тепловых процессов и специализированных программных средств автоматизированного проектирования. Применение разработанного метода позволяет сократить сроки разработки электронных средств, уменьшить затраты на проведение ресурсоемких испытаний и оперативно оценивать влияние технологических, тепловых и деградационных факторов на надежность функциональных узлов электронных средств.

**Ключевые слова:** виртуальное испытание, электронное средство, надежность, безотказность, тепловой режим, старение параметров, прогнозирование, моделирование.

**Для цитирования:** Фам, С.Х. Оценка наработки до отказа функциональных узлов электронных средств на основе виртуальных испытаний / С.Х. Фам, А.В. Долматов, С.У. Увайсов и др. // Электросвязь. – 2026. – № 3. – С. 73–82.

## ВВЕДЕНИЕ

Для функциональных узлов электронных средств (ФУ ЭС), эксплуатируемых в таких критических отраслях, как телекоммуникации, промышленная автоматизация, аэрокосмическая и военная электроника, обеспечение показателей надежности является одним из основных критериев при их проектировании. Телекоммуникационное оборудование базовых станций, транспортных сетей функционирует в круглосуточном режиме в широком диапазоне климатических воздействий и зачастую размещается в труднодоступных местах (удаленные вышки связи, необслуживаемые ретрансляторы), что затрудняет периодический контроль технического состояния. В подобных условиях возможность ремонта или замены вышедших из строя функциональных узлов практически отсутствует и отказ оборудования может привести к существенным технико-экономическим последствиям. Воздействие колебаний температур окружающей среды и естественное старение электронных компонентов в телекоммуникационной аппаратуре неизбежно приводят к дрейфу

их электрических параметров и, соответственно, к изменению электрических характеристик устройств, что критично для стабильности каналов связи, целостности сигнала и соблюдения жестких стандартов на телекоммуникационные протоколы. Методы математического моделирования в телекоммуникационной отрасли используются преимущественно для анализа характеристик передачи и обработки сигналов [1–3], а задачи прогнозирования ресурса и оценки наработки до отказа телекоммуникационного оборудования проработаны значительно слабее и требуют дальнейшего развития.

На срок службы электронных устройств влияет сочетание внутренних и внешних факторов. Среди них температура электронных компонентов, таких как резисторы, конденсаторы, транзисторы, микросхемы и др., считается основным фактором, влияющим на физическую и функциональную деградацию их электрических параметров. Воздействие высоких температур ускоряет механизмы химического и физического износа, в то время как длительное использование способствует усталости материала и