

# Надежность силовых устройств в России:

## мифы и реалии, проблемы и пути решения. Часть 1

**Несмотря на очевидные достижения в развитии электронных и электротехнических компонентов за рубежом и в России, в то же время в электроэнергетике, силовой электронике существуют серьезные проблемы по обеспечению надежности. При общем значительном улучшении качества продукции благодаря внедрению в компаниях систем управления качеством продукции на основе стандартов серии ISO9000 реальная надежность силовых устройств при эксплуатации улучшается медленнее. С каждым десятилетием и даже годом растет количество техногенных катастроф, аварий и отказов в сетях электроснабжения, системах распределения электроэнергии, в силовых исполнительных устройствах. В статье анализируются факторы, влияющие на такое неблагоприятное положение, в том числе и заметное снижение уровня и объемов работ по повышению надежности, в частности силовых устройств, особенно в России.**

**Владимир Ланцов**

vvlantsov@list.ru

**Саркис Эраносян, к. т. н.**

sergera840@mail.ru

**Д**ля лучшего восприятия выдвигаемых тезисов и конкретных примеров в статье приводятся краткая история развития теории и примеры практического обеспечения надежности, принятые основные понятия, термины и определения.

Во второй части статьи будут приведены сведения по системам управления качеством продукции системы стандартов ISO9000.

В третьей части авторы, на основе проведенного анализа, сделают некоторые обобщения и предложат мероприятия, которые способствовали бы улучшению надежности разрабатываемых силовых устройств. Более подробно будут описаны меры и практические рекомендации по обеспечению надежности импульсных источников вторичного электропитания.

Статья носит дискуссионный характер и предполагает обсуждение выдвинутых тезисов и предложений.

### Мифы и реалии надежности электроэнергетики и силовой электроники

В XXI веке энергетика бурно развивается, наряду с другими областями high-tech: нанотехнологиями, мобильной связью, компьютерной техникой. Эта тенденция отражает постоянное нарастание потребности общества в энергоресурсах. Широко обсуждаются проблема и необходимость рационального распределения энергоресурсов, а также пути их экономного использования. Среди других видов энергии электроэнергия — наиболее универсальна и необходима, так как обеспечивает потребности военной и космической техники, промышленного производства, бытовой техники, — по существу человеческого общества в целом. Потребность в электроэнергии непрерывно растет. Стремительное развитие эконо-

мики стран БРИК (Бразилия, Россия, Индия, Китай), других развивающихся стран (Мексика, Тайвань, Республика Корея, ЮАР), рост народонаселения в мире, увеличение приборо- и энерговооруженности человека на производстве и в быту — все это усиливает отмеченные тенденции.

### Надежность электроэнергетики и силовой электроники: достижения, отказы, аварии, катастрофы...

На современном этапе производители и потребители придают первостепенное значение работам по улучшению технических характеристик (снижению потерь мощности, экономичности, удобству в эксплуатации) и стоимости (удельной стоимости) первичных источников электроэнергии (в первую очередь, электростанций), различных электросистем и устройств распределения и потребления электроэнергии. При этом определенное внимание уделяется повышению их качества, надежности и гарантиям работоспособности. При анализе рекламных проспектов, каталогов, информационных дисков и другой научно-технической информации можно обнаружить, что видимых серьезных проблем с обеспечением надежности продукции не существует.

Действительно, у электротехнических и, тем более, силовых электронных компонентов достигнут не только высокий уровень параметров благодаря непрерывному внедрению новых технологий, но также улучшились и показатели надежности. Достаточно высокие или приемлемые показатели надежности приводятся и для различных энергетических и сложных электросиловых объектов и изделий, включая самые крупные. В этом ряду находятся первичные источники электропитания: гидро-, тепло-,

атомные, ветровые и иные электростанции, а также сети и системы электроснабжения. В качестве силовых устройств используются мощные преобразователи частоты для электропривода, электросиловые установки движущихся объектов, электросварочные агрегаты, импульсные и иные источники вторичного электропитания (ИВЭ) и т. д. В зависимости от сложности энергетического объекта или силового устройства в документации указываются, например, такие показатели: средняя наработка на отказ — от нескольких тысяч до сотен тысяч часов; средний срок службы восстанавливаемых (ремонтируемых) изделий — от 8 до 20 лет; технический ресурс — от 10 000 до 100 000 часов и более (термины и определения приводятся далее). При этом также указывается на возможность некоторых изделий успешно функционировать в напряженных режимах, сложных климатических и иных условиях. В принципе этой информации большинство потребителей доверяет, поскольку во многих случаях она соответствует действительности. Такое доверие основано, в том числе, и на сведениях о достигнутом высоком уровне электронных и других компонентов, широкой автоматизации процесса проектирования изделий, о передовых технологиях производства и внедрении высокопроизводительного оборудования. Большое значение имеет постоянный международный обмен перспективными идеями, достижениями и т. п. Потребители уверены, что благодаря всему перечисленному они получают реально гарантированное высокое качество и надежность изделий при эксплуатации.

Как происходит развитие силовых и сопутствующих электронных компонентов. За последние 15–20 лет в электронике в целом и в силовой электронике в частности достигнуты впечатляющие успехи: созданы принципиально новые устройства и улучшены технические характеристики уже освоенных транзисторов, тиристоров, диодов, переключающих узлов, интегральных микросхем и иных компонентов. Благодаря внедрению новых технологий у компонентов значительно повысились допустимые значения мощности, напряжения, тока, увеличилось быстродействие и, что очень важно, возросла степень интеграции. При этом произошло улучшение показателей безотказности и долговечности [1–3]. Для примера перечислим некоторые из таких достижений [1–10]:

- дискретные полевые (МОПТ или MOSFET) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (БИТЗ или IGBT) с большими величинами рассеиваемой мощности (500–900 Вт), напряжения (600–1200 В — для MOSFET; 1200, 1700 В — для IGBT) и тока (30–60 А — для MOSFET; 40–100 А — для IGBT), с повышенным быстродействием, например фирм Advance Power Technology (APT), International Rectifier (IR), Ixys, Infineon, STMicroelectronics (ST);
- силовые модули, особенно на основе IGBT, с большими величинами рассеиваемой мощности (1–2,5 кВт), напряжения (1200, 1700, 2500 В) и тока (300–1200 А и более) фирм SEMIKRON, IR, Ixys, Infineon,

Mitsubishi Electric, ОАО «Контур», ОАО «Электровыпрямитель»;

- интегрированные силовые модули (ИСМ или IPM) упомянутых фирм на основе MOSFET или IGBT, в том числе на очень большие величины рассеиваемой мощности (1–2,5 кВт), напряжения (600, 1200 В) и тока (300–2400 А); IPM включают в себя от 2 до 7 транзисторов, дополненных в ряде моделей выпрямительными мостами по однофазной или трехфазной схемам;
  - запираемые тиристоры (ГТО) с принципиально улучшенной коммутацией по затвору (GCT), особенно со встроенными микросхемами управления (IGCT), на очень большие напряжения (4500, 5500, 6000 В) и токи (400–2700 А), например компаний Mitsubishi Electric, ABB;
  - «разумные» (интеллектуальные) силовые микросхемы: интеллектуальные силовые ключи (ИСК или IPS), силовые драйверы и преобразователи частоты для управления электроприводом, например фирм ST, Infineon;
  - интегральные микросхемы и микроплаты ШИМ, ЧИМ и ККМ (PFC) контроллеров, драйверов MOSFET и IGBT, например фирм Texas Instruments (TI), IR, ST, Infineon, SEMIKRON;
  - интеллектуальные электродвигатели (например, фирмы Animatics), то есть электродвигатели со встроенными силовыми драйверами, с флэш-памятью и интерфейсными схемами, а также другие интеллектуальные исполнительные устройства и механизмы;
  - мощные высоковольтные (до 1200 В) диоды Шоттки на значительные токи (до 20 А) с высоким быстродействием на основе карбида кремния (SiC), например фирмы Cree. Значительно улучшились параметры и надежность пускателей, автоматических переключателей и автоматов защиты (например, фирм ABB, Omron) [11, 12]. Существенные успехи достигнуты в повышении удельных показателей и надежности пассивных компонентов: резисторов (Murata) [10, 13], конденсаторов (Hitano) [10, 14], магнитопроводов и моточных изделий (EPCOS) [10, 15]. Достигнут определенный прогресс в разработке компьютерных узлов, модулей и компьютерной техники в целом, сопутствующий успехам в применении силовых компонентов. Прежде всего, это создание высокоскоростных микропроцессоров (частота — до 3–4 ГГц) со встроенными ЦАП и АЦП, различных семейств микроконтроллеров для решения локальных задач автоматизации, флэш-устройств (модулей) с огромным объемом памяти (1–2 Гб и более), многоканальных устройств ввода/вывода информации и т. д.
- Одновременно с развитием электротехнических и электронных компонентов значительно повысилась степень автоматизации разработки и производства аппаратуры, что уменьшает риск снижения качества продукции за счет человеческого фактора. На производстве было внедрено большое количество нового высокопроизводительного оборудования (исключение составляет Россия, отставшая из-за проблем переходного периода 1990-х годов).

Во всем мире в большинстве фирм и предприятий были внедрены эффективные системы управления качеством продукции серии ISO9000 (далее мы подробнее рассмотрим основные положения стандартов серии ISO9000).

Все перечисленные достижения, кажется, должны были в прямой пропорции повлиять на повышение качества и надежности изделий. Однако реально этого не произошло. По этому поводу авторы придерживаются мнения, что у многих руководителей компаний, особенно в России, возникло устойчивое убеждение в том, что благодаря упомянутым впечатляющим успехам и внедрению стандартов ISO9000 качество и, в частности, надежность продукции должны обеспечиваться «автоматически». Но, к сожалению, печально известные события 1990-х годов этих ожиданий не подтвердили. При анализе реального состояния с надежностью электросиловых устройств будет полезно не рассматривать изолированно эту проблему только в России, а анализировать ее совместно с примерами из других видов техники и в различных странах. Именно в таком контексте — от общего к частному и обратно — излагаемый материал будет более нагляден для восприятия. Для иллюстрации приведем некоторые широко известные факты. По сообщениям СМИ, в последние годы в некоторых странах (во Франции, США, Великобритании, в меньшей степени в Японии и России) произошел ряд аварий на атомных электростанциях. К счастью, они не имели значительных последствий. Вместе с тем в последние годы во многих странах произошли крупнейшие аварии в электросетях, которые вызвали отключение электроснабжения и привели к тяжелым последствиям для населения, промышленности, электротранспорта, инфраструктуры и т. д. Вот перечень некоторых из них по данным [16, 17]:

- 2001 г. (январь), США (Калифорния, Сан-Франциско): без электричества остался 1 млн жителей.
- 2003 г. (14 августа), США, Канада: крупный сбой электросети — «Великий блэкаут 2003». Тогда же в Великобритании произошла самая крупная авария за последнее десятилетие: электричества лишилась четверть населения Лондона. Сентябрь, Италия: сбой в энергосети. Весь север и центр страны на сутки погрузились во тьму.
- 2005 г. (25 мая), Россия: авария энергосети в Чагино (Подмосковье). Пострадали Москва, Московская, Тульская, Калужская и Рязанская области.
- 2006 г. (14 августа), Япония: блэкаут в Токио. Причина ЧП — обрыв кабеля высокого напряжения судовым подъемным краном над рекой Эдогава. Света лишились свыше миллиона квартир в Токио, а также в городах Кавасаки и Иокогама. В Токио на 30 минут встало метро, было прекращено движение на нескольких ветках наземных электричек.
- 2006 г. (5 ноября), Западная Европа: сбой в энергосети Германии, который произошел из-за резкого роста потребления, вызванного похолоданием. Причиной сбоя стало отключение двух высоковольтных линий электропередач в Германии, после чего

фрагменты европейской энергосети стали рушиться, как «карточный» домик. Чтобы не произошло полного отключения, автоматическая система слежения за состоянием сетей стала одного за другим отключать потребителей. Этот процесс коснулся не только Германии и Франции, но и Италии, Бельгии и Испании. Кроме бытовых потребителей, были обесточены некоторые участки скоростных европейских железнодорожных магистралей.

Можно также указать на частые аварии в некоторых регионах России (Сахалин, Камчатка; другие области Дальнего Востока и Сибири и т. д.). Указанные аварии вызвали большой резонанс в обществе и обострили его внимание к проблемам надежности энергетики и силовой аппаратуры. Ведомства по чрезвычайным ситуациям в различных странах отмечают, что подобные техногенные катастрофы и аварии имеют устойчивую тенденцию к увеличению их количества с каждым годом. Компетентные эксперты такое положение связывают:

- с отсутствием на высоком уровне должного анализа подобных ситуаций для последующего принятия практических решений;
- с аномальным изменением климатической (экологической) обстановки в отдельных регионах и в мире в целом;
- с растущим негативным влиянием человеческого фактора (снижение ответственности, недостатки в обучении и переподготовке кадров, повышение напряженности в работе);
- с ослаблением внимания к работам по обеспечению живучести самих объектов (резервирование, безотказность и ремонтпригодность), в частности энергосистем и силовых устройств;
- с недостаточной отработкой алгоритмов взаимодействия между системами, устройствами и человеком (менеджером, диспетчером, оператором и др.) при возникновении аварийных ситуаций и т. д.

Отрадно, что совсем недавно, в июле 2008 года, на совещании «большой восьмерки» (G8) главы государств, наконец, договорились о создании глобального центра по мониторингу окружающей среды в мире. По замыслу такой центр должен не только отслеживать неблагоприятные изменения на суше, в воде и атмосфере, но и заранее предупреждать все страны о прогнозируемых природных катаклизмах для принятия необходимых мер.

Обсуждаемая проблема надежности оборудования и аппаратуры характерна не только для энергетики и силовой электроники, но и для многих видов техники, включая оборонные. Для иллюстрации приведем некоторые примеры катастроф, аварий и отказов из других областей техники. В СМИ не раз появлялись сообщения об участившихся авариях самолетов, в частности А310, А320, Боинг-727, Боинг-737, Боинг-747, ДС-10, Ту-154М, Як-42, Ан-140, в результате которых погибли тысячи пассажиров и нанесен большой материальный ущерб. Достаточно часто происходят катастрофы и с вертолетами (Апачи, С-78, Ми-8, КА-27, КА-32, Ми-24 и др.). При анали-

зе причин этих происшествий, кроме неблагоприятных метеорологических условий и влияния человеческого фактора, указывалось и на отказы двигателей, возгорание электроустройств и электропроводки из-за токовых перегрузок, коротких замыканий и других неполадок. Некоторые крупнейшие автомобильные компании (например, General Motors, Toyota, Volkswagen и др.) нередко отзывали обратно десятки-сотни тысяч автомобилей для существенной доработки ответственных дефектных узлов. Известны факты неполадок в космических и иных ракетах за рубежом и в России.

Мы упоминаем обо всем этом потому, что обеспечению надежности космической и оборонной техники во всех странах всегда уделялось повышенное внимание. В связи с этим большой интерес представляет работа [18], в которой обсуждаются существующие в России проблемы в данных областях техники, о которых обычно имеется мало сведений. Автор этого материала дает обобщенную оценку качества и надежности нового вооружения, поставляемого как Российской армии, так и за рубеж. Процитируем несколько фрагментов. «Несмотря на все принимаемые меры (Президентом РФ и Правительством России), надо признаться, что в оборонно-промышленном комплексе (ОПК) не удалось полностью преодолеть кризисный процесс. В этом числе негативные тенденции снижения качества вооружения, поставляемого как в рамках оборонного заказа, так и на экспорт. При том многие виды оружия находятся на уровне лучших зарубежных аналогов, а некоторые пока еще и превосходят зарубежные аналоги по тактико-техническим показателям. Но в большинстве случаев этот уровень обеспечивается с трудом. Отсутствие серийного производства современных видов оружия не способствует качественному перевооружению армии. При поставке же вооружения и военной специальной техники (ВВСТ), которые не прошли проверку в войсках, имеется большое количество претензий по качеству поставляемого ВВСТ. Это наносит удар по авторитету России».

Рассмотрим еще несколько примеров других, менее сложных силовых устройств. В работе [19] уже приводились примеры недостаточно успешных разработок мощных импульсных ИВЭ различного назначения с прогнозируемыми или уже имевшими место отказами при эксплуатации. Так, в 2001–2002 гг. на НПП корабельно-проектного профиля «Аметист» (Санкт-Петербург), в частности, шел заказ на разработку и поставку большой партии мощных импульсных современных ИВЭ. Выходная мощность источников должна быть порядка 600 Вт, выходное напряжение 27 В, КПД — не менее 0,84–0,86. Питание от трехфазной сети переменного тока  $3 \times 380 \text{ В} (\pm 20\%)$  50 Гц («треугольник»). Первоначально предусматривалось все функции управления, контроля и защиты возложить на микроконтроллер, что представлялось и рациональным, и современным решением. Но в условиях напряженной работы, когда уже была потрачена большая часть времени, выяснилось, что не удается отработать для всех режимов работы алгоритм и программу сопря-

жения мостового преобразователя на IGBT с микроконтроллером. Поэтому пришлось срочно отказаться «от услуг» микроконтроллера и просто использовать микросхему ШИМ-контроллера с двухтактным выходом (типа SG3525 или MC34025). В новом варианте доработку схемотехники ИВЭ пришлось вести в «пожарном» темпе, уже непосредственно при производстве опытных образцов и далее на поставочных образцах источников. Не подлежит сомнению, что сложные импульсные ИВЭ большой мощности, разработанные в описанных условиях, вряд ли смогут продемонстрировать высокие показатели надежности при эксплуатации.

Самое интересное, что авторам пришло сообщение из фирмы с идентичным названием («Аметист», но из другого города), о практически аналогичной ситуации. Там не удалась попытка применить микроконтроллер (TMS320F240) для управления, защиты и контроля IGBT-модулей в приводах управления синхронными двигателями. Причина практически та же — не удалось освоить в заданные сроки программирование контроллеров. Пришлось также «на ходу» прибегнуть к использованию стандартных микросхем ШИМ-контроллеров и драйверов.

В другом примере той же работы [19] описан опыт применения мощных IGBT-модулей типа BSM300GA120DN2 (Infineon) в НПП приборостроительного профиля (АО «Альбатрос», Санкт-Петербург). Модули в 1997–1998 гг. были использованы в преобразователях импульсных высоковольтных источников питания (ВВИП), предназначенных для питания рентгеновской трубки (БХВ-18) с анодной модуляцией и входящих в состав люминесцентных сепараторов минерального (алмазосодержащего) сырья. Выходные параметры ВВИП: амплитуда выходного напряжения — 10–35 кВ, амплитуда анодного тока — 50–350 мА, мощность в импульсе — до 12 кВт; частота следования импульсов — сотни герц (чаще всего 250 Гц), скважность импульсов порядка 5–8 (обычно 8). Параметры IGBT-модуля BSM300GA120DN2: напряжение UCE max = 1200 В; ток IC = 400 А (800 А имп.); мощность рассеяния P<sub>D</sub> = 2500 Вт; напряжение насыщения UCE sat = 3,3 В. После успешно проведенных настройки и испытаний опытного образца ВВИП, в том числе и у потребителя на горно-обогатительной фабрике, при выпуске установочной партии аппаратов с импульсными ВВИП, тем не менее, почти сразу начались отказы (пробои) модулей BSM300GA120DN2. Причины отказов не были ясны специалистам, поскольку модуль BSM300GA120DN2 имел в рабочих режимах огромные запасы относительно паспортных данных: UCE max = 1200 В >> 200 В напряжения питания, IC\* = 800 А имп >> 80 А имп, P<sub>D</sub> = 2500 Вт >> 35 Вт рас. Доработки, производимые эмпирическим путем, позволили значительно уменьшить количество отказов ВВИП из-за выхода из строя IGBT, но отказы не прекратились совсем. Разборка некоторых отказавших образцов модулей BSM300GA120DN2 показала, что чаще всего выходит из строя одна и та же ячейка из 4 ячеек IGBT, включенных параллельно. Вероятно,

в конструкции не было обеспечено равномерное распределение токов в ячейках при аварийных ситуациях. Но для практики эта версия разработчикам практически ничего не дала. В связи с этим ВВИП комплектовался запасным IGBT-модулем типа BSM300GA120DN2 в течение 8 лет, поскольку так и не было найдено четкой картины возникновения отказов и способов их предотвращения. В дальнейшем этот модуль был заменен на аналогичный IGBT-модуль типа МТКИ2-300-12 отечественного производства (ОАО «Электровыпрямитель», г. Саранск). МТКИ2-300-12 был освоен в производстве в 2003–2004 гг. по технологии фирмы Infineon на модуль BSM300GA120DN2. Полагаем, что при этом в конструкцию МТКИ2-300-12 были внесены некоторые улучшения. С учетом этого и других мероприятий количество отказов ВВИП из-за выхода из строя IGBT-модулей стабилизировалось на уровне 1,5–2,5% в среднем в год.

Приведем еще один пример. В продукции одного из петербургских предприятий широко используются импульсные источники питания с универсальным входом зарубежной фирмы Astec (дилер — «Гамма», Санкт-Петербург) [20]: LPS22, LPT45, LPQ112-B, LPQ-113B и др. Для них фирма указала среднюю наработку на отказ 550 000 ч. Что касается параметров, то, в частности, источники типа LPQ112-B (LPQ-113B) имеют номинальную выходную мощность 110 Вт. Они имеют 4 выходных канала: +5 В / 9 А max, +12 В (+15 В)/4,5 А max, -12 В (-15 В)/0,7 А max и независимый регулируемый канал 5–25 В/2,5 А max. Несмотря на очень большое значение средней наработки на отказ, при настройке, прогоне и приемочных испытаниях аппаратуры, содержащей источники типа LPQ112-B, LPQ-113B, из 100 образцов источников в среднем 2 практически регулярно выходили из строя (внезапные отказы). Видимые признаки отказов: а) при значительной токовой перегрузке или коротком замыкании маломощного канала -12 В (-15 В) с линейным стабилизатором; б) при последовательном соединении каналов +5 В и регулируемого канала 25 В. При эксплуатации аппаратуры с источниками LPQ112-B у потребителя (на горно-обогатительных фабриках в Якутии) у некоторых образцов источников происходили и постепенные отказы (примерно 4%). Отказы начинались после 5000–8000 часов работы (примерно через 1 год работы по 21–22 ч в день с учетом перерывов на профилактику). Чаще всего доминировали 3 типа отказов:

1. Недопустимое уменьшение напряжения в канале +5 В.
2. Ложные срабатывания защиты от токовых перегрузок.
3. Существенное увеличение пульсаций выходного напряжения, по сравнению с документацией.

Разработчики аппаратуры сделали следующие предположения о причинах этих постепенных отказов: первый и второй типы связаны, скорее всего, с влиянием «плохой» электросети у потребителя, низкой надежностью установочных переменных резисто-

ров и некорректными действиями обслуживающего персонала. Третий тип отказов связан с ухудшением параметров (увеличением импеданса) во времени электролитических конденсаторов в сглаживающих выходных фильтрах.

Перейдем далее к изложению кратких сведений по теории надежности и практическим вопросам ее обеспечения, чтобы в дальнейшем излагать материал в узаконенных терминах и определениях. С другой стороны, это позволит корректно сравнивать постановку работ по обеспечению надежности изделий ранее и сейчас.

### Надежность изделий: краткая история развития; основные понятия, термины и определения

#### Краткая история развития

Надежность, как новая теория, стала оформляться после Второй мировой войны, прежде всего, за рубежом, в США. Ее возникновение было связано с настоятельной необходимостью в решении практических задач по обеспечению приемлемых показателей работоспособности больших систем: вычислительных машин, все более сложных систем вооружения и других, создаваемых в то время. При их эксплуатации выяснилось, в частности, что время нормального функционирования систем между отказами (неисправностями) мало. Например, по американским данным, относящимся к 1949 г., аппаратура радиосвязи находилась в нерабочем состоянии примерно 14% времени, а гидроакустическая и радиолокационная аппаратура — соответственно 48% и 84% (!). Достаточно ясно проблема надежности оформилась в США в 1950–1951 гг., где исследованиями надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) занялся ряд частных фирм, а также специально созданных правительством групп и исследовательских центров. Первоначально исследовательские центры и промышленные фирмы начали практическую работу по значительному повышению безотказности и долговечности составляющих компонентов систем: электровакуумных приборов, электромеханических реле, переключателей, пассивных компонентов, а затем и полупроводниковых приборов. За 10 лет работы в этом направлении были достигнуты значительные успехи по обеспечению надежности аппаратуры. Так, в 1959 г. время нерабочего состояния корабельной радиопередающей, гидроакустической и радиолокационной аппаратуры составило соответственно 2, 6%, 2,8% и 0,2% (без учета времени профилактики) [21]. Несколькими позднее стала оформляться теоретическая база надежности как научной дисциплины на основе теории вероятности, математической статистики, теории случайных процессов, а затем теории информации, теории массового обслуживания, основ взаимоотношений в комплексах «человек – машина».

С некоторым отставанием от зарубежных исследователей теория надежности стала бурно развиваться и в СССР. Советские ученые

А. И. Берг, Б. В. Гнеденко, А. Н. Колмогоров, Я. М. Сорин, И. М. Маликов, Я. Б. Шор, Н. А. Шишонок, Б. Е. Бердичевский и другие внесли большой вклад в развитие теории надежности. Осенью 1957 г. в Москве была проведена первая Всесоюзная конференция по надежности. С этого момента во многих вузах начинается серьезная научная работа по изучению основ теории надежности и эксплуатации приборов и аппаратуры, прежде всего РЭА. Так, в КВИРТУ (Киев), под руководством Н. А. Шишонка создается первая в СССР кафедра «Основы надежности и эксплуатации радиотехнических систем». В Москве академик Б. В. Гнеденко организует вместе соратниками Всесоюзный семинар по различным вопросам надежности при Политехническом музее.

Основное назначение теории надежности как новой научной дисциплины — это изучение закономерностей, которых следует придерживаться при проектировании, испытании, изготовлении, приемке и эксплуатации изделий для получения максимальной эффективности их использования [22]. То есть теория надежности должна была устанавливать закономерности возникновения *отказов* и *восстановления* работоспособности изделий, рассматривать влияние внешних и внутренних воздействий на процессы, происходящие в изделиях, создавать основы расчета надежности и прогнозирования отказов. При этом должны изыскиваться способы повышения надежности при разработке, конструировании и изготовлении изделий, создаваться методы проведения испытаний на надежность, методы обработки и оценки результатов испытаний, а также способы контроля и сохранения надежности изделий при эксплуатации. В теории надежности устанавливаются количественные характеристики (критерии) надежности, связь между количественными характеристиками и эффективностью (экономической эффективностью) изделия. Методы обоснования режимов профилактических (регламентных) работ при эксплуатации изделий и норм запасных частей (устройств, компонентов) также являются продуктом применения теории надежности на практике.

#### Основные понятия, термины и определения в теории надежности

Приведем основные понятия, термины и определения в теории надежности, придерживаясь действующего в России ГОСТ 27.002-89 одноименного названия. Представленные там формулировки практически соответствуют материалам ранее упоминавшегося фундаментального труда 1963 г. [22].

**Надежность** — совокупность свойств изделия, определяющих его пригодность для использования по назначению и связанных с возможностью появления неисправностей при его *эксплуатации*. В обобщенном смысле под *эксплуатацией* изделия понимается совокупность всех фаз его существования: транспортировки, хранения, подготовки к использованию, использования по назначению, технического обслуживания и ремонтов. В более узком практическом смысле фазы транспор-

тировки и подготовки к использованию не учитывают из-за их кратковременности. Поэтому основные фазы — это хранение и собственно эксплуатация с техническим обслуживанием и ремонтами. Именно в этом случае изделие длительно работает в основных режимах, для которых оно и предназначено. Надежность является одной из сторон качества, частью качества, причем зачастую его важнейшей частью.

**Безотказность** — способность изделия сохранять работоспособность (то есть не иметь отказов) в течение заданного времени в определенных условиях эксплуатации.

**Отказ** — это полная или частичная утрата работоспособности.

**Работоспособность** — это такое состояние изделия, при котором оно соответствует всем требованиям, установленным в отношении его параметров. Если изделие не соответствует некоторым требованиям к его второстепенным параметрам, то такое состояние называется *неисправностью (дефектом)*. При этом работоспособность изделия не нарушается и отказ не имеет места. *Отказы* подразделяются на *внезапные (катастрофические)* и *постепенные*. *Постепенные отказы* возникают при постепенном изменении параметров изделия (вследствие старения, износа), когда эти параметры выходят за пределы установленных допусков. Поэтому постепенные отказы можно предвидеть (прогнозировать), если регулярно следить за изменением определяющих параметров изделия. *Внезапные отказы* не связаны с постепенным изменением параметров изделия, поэтому их практически невозможно прогнозировать.

**Интенсивность отказов** (индивидуальная долговечность) — это одна из важнейших характеристик *невосстанавливаемых* изделий, например электронных компонентов. *Интенсивность отказов*  $\lambda(t)$  определяется количеством отказов изделий, зафиксированных в единицу времени (1/ч или ч<sup>-1</sup>). Обратная *интенсивности отказов*  $\lambda$  величина для *невосстанавливаемых* изделий называется **средним временем между отказами** (*наработкой на отказ*) и обозначается  $t_{cp}$ . Принято считать, что для РЭА *интенсивность отказов*  $\lambda(t)$  можно считать величиной, не зависящей от времени ( $\lambda = \text{const}$ ), если аппаратура находится в нормальном режиме работы, то есть прошла *период приработки* (период «выжигания» дефек-

тных изделий). Продолжительность этого периода составляет, как правило, 100–120 ч, в зависимости от сложности изделия. Для элементов РЭА, у которых преобладают внезапные отказы, распределение отказов часто является экспоненциальной функцией. Поэтому вероятность безотказной работы *невосстанавливаемого* изделия за время  $t$ , то есть  $P(t)$ , определяется следующими выражениями:

$$t_{cp} = 1 / \lambda,$$

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/t_{cp}}$$

или

$$P(t) = \exp(-t/t_{cp}).$$

Экспоненциальное распределение отказов не является единственно возможным для компонентов. Для некоторых видов компонентов действуют другие вероятностные распределения отказов: например, для электровакуумных приборов и некоторых деталей машин действует распределение Вейбулла, для электромеханических компонентов (например, реле) — распределение Пуассона и т. д. Для *восстанавливаемых* изделий *параметр потока отказов*  $\Lambda(t)$ , который определяет собой среднее число отказов в единицу времени вблизи момента времени  $t$ . К нему в принципе применимы те же соображения и формулы, что и для *невосстанавливаемых* изделий, то есть  $\Lambda(t)$  не зависит от времени в периоде нормальной эксплуатации после приработки ( $\Lambda = \text{const}$ ). Другие соотношения:

$$\Lambda = 1/T_{cp},$$

и

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

где  $T_{cp}$  — среднее время между отказами (другие обозначения —  $T$  или  $T_0$ ), или наработка на отказ.

**Долговечность** — способность изделия к длительной эксплуатации при необходимом техническом обслуживании, в которое могут входить и различные виды ремонта. Долговечность характеризуется либо временем эксплуатации, либо числом циклов функционирования, либо объемом произведенной работы. *Технический ресурс* изделия определяется такой продолжительностью эксплуатации изделия, при котором оно не достигло усиленного износа, то есть временем нормальной эксплуатации.

**Ремонтопригодность** (*восстанавливаемость*) — приспособленность изделия к предупреждению, обнаружению и устранению отказов. Ремонтопригодность характеризуется затратами времени, труда и средств на указанные работы.

Продолжение следует

## Литература

1. Ланцов В., Эраносян С. Интеллектуальная силовая электроника: вчера, сегодня, завтра // Силовая электроника. 2006. № 1.
2. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
3. Флоренцев С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // Современные технологии автоматизации. 2004. № 2.
4. Аксенов В., Бормотов А. и др. IGBT-модули производства ОАО «Электровыпрямитель» // Силовая электроника. 2006. № 2.
5. Ямада Ю., Симизу Т. и др. (перевод). Новые высокоэффективные и высоконадежные модули IGBT // Силовая электроника. 2006. № 3.
6. [www.semikron.com](http://www.semikron.com)
7. Колпаков А. Оптимизация характеристик силовых модулей для сложных условий эксплуатации // Силовая электроника. 2008. № 1.
8. Ланцов В., Эраносян С. Интегрированные компоненты — основа построения современных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 3.
9. Смердов В., Ковнерев М. Запираемые тиристоры // Электронные компоненты. 2005. № 4.
10. [www.farnellinone.com](http://www.farnellinone.com)
11. [www.abb.com](http://www.abb.com)
12. [www.omron.com](http://www.omron.com)
13. [www.murata.com](http://www.murata.com)
14. [www.hitano.com](http://www.hitano.com)
15. [www.epcos.com](http://www.epcos.com)
16. [www.google.ru](http://www.google.ru)/аварии электросетей
17. [www.google.ru](http://www.google.ru)/аварии электросилового оборудования
18. Маянский В. Комплексная оценка предприятий оборонно-промышленного комплекса как метод обеспечения качества продукции оборонного назначения и снижения риска государственного заказчика // Современная электроника. 2008. № 4.
19. Ланцов В., Эраносян С. Успехи, трудности и проблемы на пути развития силовой электроники в России // Силовая электроника. 2008. № 1.
20. [www.astec.com](http://www.astec.com)
21. Луцкий В. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры. Киев: Изд-во Академии наук УССР, 1963.
22. Надежность. / В «Энциклопедии современной техники». Под ред. А. И. Берга и В. А. Трапезникова. М. Госиздат «Советская энциклопедия: энциклопедии, словари, справочники», 1963