

# ЭВОЛЮЦИЯ ВЗГЛЯДОВ НА НАДЕЖНОСТЬ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

С проблемой обеспечения надежности человек сталкивается с тех самых пор, как начал что-то строить и сооружать. Но развитие теории надежности как научной дисциплины следует отнести ко второй половине 40-х годов XX столетия в связи с началом применения в армейских подразделениях новых по тем временам радиоэлектронных устройств. В первую очередь это относится к системам радиолокации, которые при всей своей перспективности вначале отличались крайне низкой надежностью. В [1] приводятся данные из военных архивов о работе радиолокационных станций США во время корейской войны 1950-х годов: из семи дней станция работала в среднем один день, а шесть дней ремонтировалась. Это вызывало много проблем, связанных с ее эксплуатацией. Выяснилось, что надо решать массу задач по конструированию из ненадежных элементов надежных систем и разработке методов их испытаний, научиться оценивать продолжительность работы аппаратуры, рассчитывать количество запасных частей, необходимых для обеспечения быстроты ремонта и т.д., и т.п.

Об остроте проблемы обеспечения надежности первых радиоэлектронных устройств свидетельствует тот факт, что в США, начиная с 1954 г., стали регулярно проводиться симпозиумы по надежности. И первые 7 из них (до 1962 года) были посвящены почти исключительно проблемам радиоэлектроники. Только начиная с восьмого симпозиума, то есть спустя 10 лет, была расширена тематика этих симпозиумов. Пришло осознание универсальности понятия надежности и применимости его ко всем сложным инженерно-техническим системам, а не только к радиоэлектронным устройствам [3]. В Советском Союзе первая всесоюзная конференция по надежности состоялась в Москве в 1958 г.

Именно противоречие между острой необходимостью в новой технике и низкой ее надежностью дало мощный импульс для развития науки о надежности - отрасли знания, которая занимается изучением закономерностей возникновения отказов технических систем, разработкой методов их анализа, принципов конструирования и многими другими сопряженными задачами [1, 2, 3, 4, 13].

Разработчики радиоэлектронной техники на основании опыта ее применения очень быстро пришли к выводу о том, что в сложных системах, состоящих из большого количества элементов и связей между ними, невозможно проследить за состоянием каждого элемента и учесть влияние множества внешних факторов, приводящих к отказам. Отказы всегда появлялись в случайных местах и в случайные моменты времени, не поддаваясь точному прогнозу. Поэтому они были отнесены к разряду случайных событий.

В условиях неподконтрольности текущего состояния сложных систем доступной оставалась только информация о наличии или отсутствии отказов в течение наблюдаемого периода времени. Поскольку подсчет отказов дело не столь сложное, то эти данные становятся основной информационной базой для статистических расчетов показателей

надежности технических систем. По этой же причине их состояние стали оценивать по бинарной шкале: «годен – не годен», исключив из рассмотрения все промежуточные состояния [4, 5, 6].

Реальность оказалась такой, что для конкретного объекта в условиях его применения можно указать только интервал времени, в пределах которого следует ожидать (или не ожидать) его отказа с некоторой вероятностью, а применительно к совокупности объектов доступно только предсказание вероятной доли отказавших объектов в пределах интересующего нас интервала времени. Другими словами, случайный характер отказов делает применение теории надежности возможным только к массовым явлениям, а не к единичным событиям или объектам [4].

По мере совершенствования материалов и технологий росла и надежность технических систем. Вместе с этим росли затраты на испытания на надежность из-за увеличения их продолжительности. Осмысление этих трудностей привело к пониманию того, что применение чисто статистических методов анализа надежности высоконадежных объектов во многих случаях оказывается малоэффективным – требуются большие затраты для получения даже минимальной информации об отказах, которые, как уже говорилось, являются основой для расчета показателей надежности. Связано это с тем, что статистический подход к оценке показателей надежности не предполагает изучения кинетики изменения их текущего состояния, то есть не дает информации, которая в принципе позволяет строить прогнозные модели. Поэтому длительность испытаний при статистическом подходе определяется временем до появления достаточного количества отказов, что сопоставимо с ресурсом испытываемых объектов.

Поиск путей снижения издержек на проведение испытаний на надежность привел инженеров к мысли о необходимости изучения закономерностей изменения текущего состояния объектов, что позволило бы прогнозировать конечный результат по данным наблюдений на сравнительно коротком отрезке времени. Так в теории надежности появилось направление, связанное с изучением кинетики процессов старения и износа материалов. Эти изыскания привели в итоге к внедрению в практику так называемых ускоренных (форсированных) методов испытаний, которые позволяли за счет увеличения интенсивности внешних воздействий многократно (в десятки и сотни раз) сократить продолжительность испытаний [8, 9, 22]. Получаемые при этом значения показателей надежности затем по определенным правилам пересчитывались на эксплуатационные значения интенсивности воздействующих факторов.

Начало развития работ в области надежности кабелей и проводов приходится на вторую половину 1960-х годов в связи с распространением на них требований к надежности радиоэлектронных систем и устройств, в которые они входили в качестве комплектующих [7, 8, 19]. Естественно,

что вся методология нормирования и оценивания показателей надежности радиоэлектронных систем практически без изменения была перенесена на кабельную продукцию [7, 8, 9]. В этом контексте кабели и провода рассматривались как дискретные (счетные) объекты с относительно невысоким ресурсом. Однако очень скоро стало ясно, что такой прямолинейный подход приводит к большим методологическим трудностям. С одной стороны, при ближайшем рассмотрении кабели не являются счетными объектами [8, 16, 17], а с другой – они представляют собой высоконадежные комплектующие с большим ресурсом, исчисляемым десятками тысяч часов.

Суть первой из указанных проблем состоит в том, что кабель или провод представляют собой отдельную реализацию случайного процесса, порождаемого соответствующей технологией, подверженной воздействию случайных флуктуаций. Технические характеристики кабельной продукции зависят от длины и нормируются на единицу длины. Историческим исключением являются показатели надежности, так как взяты они из арсенала надежности дискретных объектов. Это обстоятельство приводит к абсурдным логическим результатам при планировании контроля качества и испытаний на надежность. Дело в том, что принятая в кабельной промышленности методология статистического оценивания базируется на дискретной математике, которая оперирует со счетными объектами [4–6]. Поэтому объем выборки, от которой зависит достоверность оценок, определяется количеством образцов. При этом длина образца не принимается в расчет – ей в этой логике просто нет места. Последнее обстоятельство позволяет получать результаты с любой наперед заданной достоверностью, деля исходный отрезок кабеля или провода фиксированной длины на соответствующее число более коротких образцов. В результате мы приходим к абсурду, так как, с одной стороны, реальный объем выборки (а значит и достоверность результатов) определяется фиксированной длиной исходного отрезка, а с другой – поделив этот отрезок на нужное число образцов, мы можем получить любую наперед заданную достоверность оценок.

Поскольку эта проблема имеет сугубо технический характер, то на нее внимания особенно не обращают, хотя ее решение и позволит упростить ряд методик испытаний и одновременно избавиться от логических противоречий. Простейший вариант решения указанного логического противоречия лежит в представлении кабеля как последовательности отрезков фиксированной длины, для получения более глубоких результатов следует обратиться к идеям и методам теории случайных процессов [16, 17, 28, 29], что особенно может быть полезным для анализа качества технологии.

Вторая и более серьезная из двух указанных выше проблем – большой ресурс – не позволяет получить разумных оценок показателей надежности за обозримое время из-за отсутствия отказов. Это обрекает нас на необходимость оперировать с нулевой информацией об отказах, что влечет за собой рост объема испытываемой выборки для получения приемлемых оценок показателей надежности [8, 10]. Попытки преодоления этой трудности привели к тому, что в середине 1970-х годов акцент был смещен с «чисто вероятностных» показателей надежности (интенсивность отказа, вероятность безотказной работы и т.п.) на «временные» показатели (ресурс, наработка, срок службы и т.д.).

Имеющийся опыт создавал ощущение, что «временные» показатели надежности наиболее точно отражают суть дела для кабельной продукции [8, 9, 11, 12, 13, 14,

15], так как большие «запасы прочности» по нормируемым показателям позволяли не беспокоиться об отказах в течение всего срока эксплуатации, указываемого в технической документации. Поэтому перенос «центра тяжести» на «временные» показатели подразумевал по умолчанию 100%-ную безотказность изделий в период времени, указанный в технической документации на кабельную продукцию. Таким образом, полагалось, что в период нормированного времени эксплуатации процессы старения не приводят к критическим изменениям свойств кабельной продукции и не ухудшают ее показатели безотказности. Для документальной реализации этих идей были введены в обращение такие «внеГОСТовские» показатели, как «минимальная наработка» или «минимальный срок службы».

«Ставка» на «временные» показатели надежности открыла широкую дорогу использованию ускоренных методов испытаний [8, 9, 14, 15], что позволило серьезно сократить издержки на испытания кабельной продукции. К сожалению, и здесь не обошлось без проблем, так как многие заказчики восприняли результаты ускоренных испытаний, как истину в последней инстанции, которая, по их мнению, должна иметь смысл гарантий. Это обстоятельство сильно усложняло жизнь разработчикам кабелей и проводов, так как на самом деле реальность гораздо сложнее. Дело в том, что получаемые в результате ускоренных испытаний данные являются в значительной мере условными, так как проводятся при стандартизированных режимах. Как правило, эти режимы имеют мало общего с реальными условиями эксплуатации. Укажем на три наиболее важных на наш взгляд обстоятельства, отличающие условия эксплуатации от условий ускоренных испытаний.

Во-первых, в абсолютном большинстве случаев неизвестна степень влияния на объект неучтенных внешних факторов при снижении интенсивности форсированного фактора до значений, близких к эксплуатационным. Например, при проведении ресурсных испытаний под воздействием электрического поля высокой напряженности, превышающей порог ионизации, частичные разряды являются основным фактором, определяющим ресурс изоляции [12]. При снижении напряженности поля ниже порога ионизации влияние электрического поля снижается настолько, что ресурс изоляции начинают определять другие «конкуренты» (температура, влажность, солнечная радиация и т.п.).

Во-вторых, в реальных условиях эксплуатации интенсивность внешних воздействий, как и их набор, изменяются случайным образом на протяжении всего срока эксплуатации. Поэтому старение по сути является тем же случайным процессом, требующим для своего анализа соответствующего аппарата [5, 29, 35]. Лабораторные же испытания, как правило, проводятся в стационарных условиях с фиксированным набором воздействий и их интенсивностей.

В-третьих, имеется опасность изменения кинетических закономерностей процессов старения при экстраполяции результатов форсированных испытаний в область эксплуатационных значений. В частности, может измениться физическое состояние материала из-за наступления стеклования в полимерах [22], которое влечет за собой изменение кинетики протекающих в нем процессов; может смениться механизм старения, как в случае высоковольтных испытаний [12], может оказаться заметным влияние диффузионных процессов (например, кислорода [22, 25]) и т.п.

К сказанному следует добавить и многообразие условий эксплуатации одного и того же типа кабеля или провода.

Таким образом, будучи весьма эффективным исследовательским инструментом, ускоренные испытания требуют

вдумчивого отношения к интерпретации полученных результатов. Реально возможности ускоренных испытаний ограничены тем, что они всего лишь позволяют ранжировать исследуемые материалы и изделия по их стойкости к выбранным воздействиям (примером является температурный индекс для эмалированных проводов). Придавать этим результатам смысл гарантий – значит заниматься самообманом.

Предполагаемое отсутствие отказов в период установленных сроков хранения и эксплуатации позволило сделать еще один шаг в неизвестное и перевести проблему оценки надежности из области испытаний на надежность в область контроля качества продукции на производстве. Руководством к действию здесь была идея о том, что изначально качественная продукция будет оставаться таковой и в течение всего разрешенного срока эксплуатации [8]. Иначе говоря, гарантии по надежности заменялись гарантией стабильности технологии производства, которая по замыслу должна обеспечивать требуемый нижний уровень надежности. Так появилось понятие «технологической надежности» [8, 26, 27].

Введение в практику понятия технологической надежности облегчило жизнь изготовителю, но на тот момент не решало проблему гарантий по существу. Начнем с того, что для реализации идей технологической надежности необходим соответствующий объем знаний о влиянии технологии на свойства перерабатываемых материалов и их возможных долговременных последствий на структурном уровне. Таких знаний на тот период (1970-ые годы) практически не было, как не было и соответствующего методического опыта. Поэтому проблема обеспечения технологической надежности решалась на уровне контроля штатных технических характеристик, нормируемых в технической документации на кабельную продукцию. Вопрос об эффективности такого подхода не рассматривался, так как ответить на него было трудно в силу недостатка знаний.

Описанную ситуацию можно проиллюстрировать на следующем примере. Для многих низковольтных изделий качество технологии оценивалась по уровню и стабильности пробивного напряжения. В то же время, как показывает опыт, этот показатель не чувствителен к изменению технологических режимов и процессам старения. Технологи, например, знают, что неправильные температурные режимы при экструзии полиэтилена или фторполимеров могут приводить к преждевременному растрескиванию изоляции при хороших статистических показателях качества, определяемых по пробивному напряжению в исходном состоянии. Вторая сторона этой же «медали» состоит в том, что в процессе старения пробой наступает без видимой предыстории как следствие механического разрушения изоляции. Это указывает на то, что надежность изоляции определяется процессами, происходящими на молекулярном и надмолекулярном уровнях, которые в первую очередь влияют на механические, а не на электрические свойства полимера [например, 36].

В современных условиях возможности решения задач по обеспечению надежности с позиции технологии выглядят более обнадеживающими, т.к., с одной стороны, стали более доступными методы анализа полимеров, а с другой, постепенно накапливаются знания (которых раньше не было) о влиянии технологий на состав, структуру и свойства материалов и их поведение под воздействием внешних факторов [например, 21, 23, 30–32].

Другая проблема реализации идеи технологической надежности заключается в том, что используемые методы контроля качества кабельной продукции в подавляющем

большинстве случаев являются выборочными. А это означает, что остается конечная вероятность того, что потребителю уйдет товар с несоответствующим качеством. Об абсолютных гарантиях можно говорить только при наличии сплошного 100%-ного контроля качества готовой продукции и технологии. Такой контроль могли бы обеспечить автоматизированные системы управления технологическими процессами. Но даже и в этом случае остаются трудные решаемые вопросы контроля стабильности применяемых материалов и влияния на них технологии (см. выше). Поэтому вопрос об абсолютных гарантиях, остается открытым. Да, принимаемые меры позволяют повысить качество продукции, но полностью уйти от вероятностных формулировок показателей надежности не удастся. К этому следует относиться, как к объективной данности.

По мере накопления опыта жизнь указала еще на одну проблему, связанную с надежностью. Дело в том, что реальные условия эксплуатации зачастую бывают более «мягкими» по сравнению с предельными режимами, указанными в технической документации и для которых нормируются показатели надежности. Это приводит к тому, что к концу гарантийного срока эксплуатации кабель или провод остаются еще в хорошем техническом состоянии и пригодны для дальнейшей эксплуатации. В некоторых случаях имеется явная экономическая целесообразность продления гарантий на такие изделия (особенно это актуально для таких дорогостоящих групп, как кабели связи, управления, силовые). Но возникает вопрос, на какой срок продлевать гарантии? Поиск ответа на этот вопрос инициировал разработку методов диагностики изделий в период их эксплуатации и прогнозирования остаточного ресурса. Эти методы, как правило, базируются на результатах исследований кинетики процессов, определяющих старение материалов под воздействием внешних факторов [20–24], и сопряжены с теми же проблемами, что и ускоренные испытания, и технологическая надежность.

Некоторые, из стоящих в этой области задач, уже нашли свое решение. Например, установлено, что в случае теплового воздействия для ПВХ пластикатов важную роль в изменении их механических характеристик играет десорбция пластификаторов [20, 21]; для полиолефинов решающим фактором является расходование стабилизатора, тормозящего процесс цепного окисления [22]; для резин – расходование стабилизаторов и изменение топологии сетки под действием процессов деструкции и сшивки [23, 24], для высоковольтной изоляции – развитие трингов [33, 34] и т.д. Однако эта тема настолько обширна в силу большого разнообразия применяемых материалов и воздействующих факторов, что работы хватит не одному поколению исследователей.

За прошедшие более, чем 40 лет накоплен большой опыт в области теории и практики надежности кабельной продукции. Естественно, что многие проблемы, включая перечисленные выше, сегодня видятся не так, как они виделись в начале пути. Это обстоятельство неизбежно приводит к их переосмыслению с целью поиска более эффективных путей решения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Карцев В.Е., Хазановский П.М. Стихиям не подвластен. – М.: Знание, 1980. – 192 с.
2. Мур Е., Шеннон К. Надежные схемы из ненадежных реле // Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. / Пер. с англ. под ред. Р.Л. Добрушина и О.Е. Лупанова. – М.: ИЛ, 1963.

3. *Ригрсон С.М.* Прошлое и настоящее проблемы надежности и контроля качества // Труды Американского института радиоинженеров. – 1962. – N 5, часть 2. – С. 1381–1400.  
 4. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965 г. – 452 с.  
 5. *Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б.* Модели отказов. – М.: Сов.радио, 1966. – 166 с.  
 6. *Барлоу Р., Прошан Ф.* Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984. – 327 с.  
 7. Монтажные провода для радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. Л.И. Кранихфельда. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.  
 8. Надежность кабелей и проводов для радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. Л.И. Кранихфельда, И.Б. Пешкова. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 199 с.  
 9. *Пешков И.Б.* Обмоточные провода. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 350 с.  
 10. *Шор Я.Б., Кузьмин Ф.И.* Таблицы для анализа и контроля надежности. – М.: Советское радио, 1968. – 284 с.  
 11. *Меламедов И.М.* Физические основы надежности. – Л.: Энергия, 1970. – 152 с.  
 12. *Койков С.Н., Цикин А.Н.* Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. – Л.: Энергия, Ленингр.отд-ние, 1968. – 185 с.  
 13. Справочник по надежности / Пер. с англ. Под редакцией Б.Р. Левина. – М.: Мир, 1969. – Т. 1. – 185 с.  
 14. Кабели и провода для ядерных энергетических установок / Под ред. Э.Э. Финкеля. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 133 с.  
 15. *Холодный С.Д.* Методы испытаний и диагностики кабелей и проводов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.  
 16. *Абрамов К.К.* Оценка прочности и надежности кабельных изделий по результатам испытаний коротких образцов // Труды ВНИИ КП. – 1970. – Вып. 14. – С. 43.  
 17. *Абрамов К.К.* Пересчет статистических характеристик параметров кабельных изделий на различные длины // Труды ВНИИ КП. – 1969. – Вып. 13. – С. 69–80.  
 18. ГОСТ 27.002. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.  
 19. *Кранихфельд Л.И.* Исследование монтажных проводов для радиоэлектронной аппаратуры: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: ВЭИ, 1968.  
 20. *Быков Е.В., Кранихфельд Л.И., Румянцев Д.Д., Федорович Е.А.* Метод прогнозирования долговечности ПВХ-пластика и изделий из него // Кабельная техника. – 1980. – Вып. 4 (182). – С. 19–21.  
 21. *Быстрицкая Е.В., Карпунин О.Н., Крючков А.А.* Применение термогравиметрического анализа для прогнозирования десорб-

ции пластификаторов из поливинилхлоридных пластикатов // Высокомолек. Соед., Б. – 2006. – Т. 48, № 2. – С. 370–375.  
 22. *Эммануэль Н.М., Бучаченко А.Л.* Химическая физика старения и стабилизации полимеров. – М.: Наука, 1982.  
 23. *Платонова О.Н., Быстрицкая Е.В., Гальперина Н.И., Трофимович Д.П.* Расходование антиоксиданта при термостарении // Каучук и резина. – 1987. – № 9. – С. 21–23.  
 24. *Каменский М.К., Крючков А.А., Бойков В.А., Быстрицкая Е.В.* Оценка долговечности пожаробезопасных кабелей // Кабели и провода. – 200. – № 4 (305). – С. 16.  
 25. *Быков Е.В., Быстрицкая Е.В., Карпунин О.Н.* Оценка толщины радиационно-окисленного слоя облуженного полиэтилена // Высокомолек. соед. – 1987. – Т. 29А, № 3. – С. 1347.  
 26. *Веселовский С.Б., Кранихфельд Л.И.* Управление качеством кабельной продукции путем контроля технологической надежности // Стандарты и качество. – 1973. – № 9. – С. 17–19.  
 27. *Ларина Э.Т., Пешков И.Б.* Разработка методики определения технологической надежности эмалированных проводов // Труды ВНИИ КП. – 1975. – Вып. 18. – С. 123–132.  
 28. *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. – М.: Наука, 1966.  
 29. *Кендалл М.Дж., Стьюарт А.* Многомерный статистический анализ и временные ряды. – М.: Наука, 1976.  
 30. *Шувалов М.Ю., Овсипенко В.Л.* Анализ структуры экструдированной изоляции высоковольтных кабелей методом видеомикроскопии // Электричество. – 1999. – № 7. – С. 51–58.  
 31. *Шувалов М.Ю., Карсанкова М.С.* Методические аспекты диагностики изоляции маслonaполненных кабелей микроскопическими методами (анализ кабельных бумаж) // Кабели и провода. – 2002. – № 1. – С. 17–20.  
 32. *Шувалов М.Ю., Овсипенко В.Л., Карсанкова М.С.* Моделирование старения кабельных диэлектриков на основе данных спектрального анализа // Кабели и провода. – 2003. – № 2. – С. 8–11.  
 33. *Шувалов М.Ю., Овсипенко В.Л.* Некоторые аспекты диагностики силовых кабелей высокого напряжения // Кабели и провода. – 2001. – № 3. – С. 27–29.  
 34. *Шувалов М.Ю., Маврин М.А.* Теоретическое и экспериментальное исследование водных триингов «бант» // Кабели и провода. – 2002. – № 1. – С. 44  
 35. *Богданов Дж., Кизин Ф.* Вероятностные модели накопления повреждений. – М.: Мир, 1989.  
 36. *Быков Е.В., Быстрицкая Е.В., Карпунин О.Н.* О причинах расстрескивания полиэтилена под действием радиации // Высокомолек. соед. – 1985. – Т. 27 Б, № 10. – С. 776.

## ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА» МОЖНО В РЕДАКЦИИ

**Стоимость подписки на II полугодие 2011 года (3 номера), в рублях с учетом НДС:**

для членов Ассоциации «Электрокабель» – 1275 руб.,  
 для учебных заведений и студентов – 480 руб.,  
 для остальных подписчиков России и стран СНГ – 1380 руб.,  
 для подписчиков других зарубежных стран – 33 у.е.

**По вопросам подписки обращайтесь**  
 к Алле Евгеньевне Тимофеевой: (495) 918–1627

Копию платежного поручения с отметкой банка об исполнении для юридических лиц или квитанцию почтового перевода для физических лиц вышлите, пожалуйста, по адресу:  
 ООО «Журнал «Кабели и Провода», Россия, 111024, Москва, шоссе Энтузиастов, дом 5, офис 1202. E-mail: kp@vniikp.ru

### Реквизиты для оплаты в рублях:

ИНН 7722159427;  
 КПП 772201001;  
 ОКОНХ 87100  
 р/с: 40702810238120102932  
 в Лефортовском ОСБ 6901, г. Москва  
 «Сбербанк России ОАО», г. Москва,  
 к/с: 30101810400000000225  
 БИК 044525225; ОКПО 18711078.

**Подписной индекс**

в каталоге агентства «Роспечать» – **79943**