

# Прямоугольные электрические соединители.

## Статистические методы испытания электрических соединителей на надежность

**В статье рассмотрены особенности организации испытаний электрических соединителей на надежность с использованием статистических методов. Предложены методы проведения ускоренных испытаний и классификация отказов по причинам их возникновения. Рассмотрены основные принципы качественного анализа отказов и предварительной обработки результатов испытаний соединителей. Даны рекомендации по обеспечению достоверной оценки показателей надежности при сравнительно небольшом объеме испытаний.**

**Александр Сафонов  
Леонид Сафонов**

edet@online.debryansk.ru

### Введение

В современном производстве электрических соединителей все большее значение приобретают статистические методы управления качеством продукции. Эти методы основаны на использовании статистических (вероятностных) закономерностей, имеющих место при повторении часто случающихся событий. Целый ряд случайных факторов — неоднородность исходных материалов и комплектующих изделий, неточность изготовления деталей и сборочных единиц, изменение характеристик средств измерений и испытаний, различие в квалификации производственного персонала и т. п. обуславливают, в конечном счете, разброс показателей качества выпускаемых соединителей.

Математической основой статистического контроля качества электрических соединителей служат теория вероятностей и математическая статистика.

Отметим, что в общем случае организация статистического контроля в производстве продукции связана с необходимостью сбора и обработки больших массивов статистических данных о показателях качества продукции. В то же время, использование статистических методов контроля показателей качества продукции позволяет более оптимально управлять сложными технологическими процессами производства электрических соединителей.

На практике различают два основных вида статистического контроля качества:

- статистическое регулирование — текущий контроль производственного процесса методами математической статистики;
- математико-статистические выборочные методы.

Главная цель статистического регулирования — предупреждение брака путем своевременного вмешательства в технологический процесс.

Математико-статистические выборочные методы предназначены, как правило, для контроля готовой

продукции. Они позволяют определять объем брака и источники его возникновения в технологическом процессе или же качественные недостатки и несоответствия в процессе проведения различных видов испытаний.

В общем случае, статистическое управление качеством продукции реализуется за счет:

- статистической оценки параметров распределения контролируемой случайной величины;
- статистического анализа точности и стабильности технологического процесса;
- статистического регулирования технологического процесса;
- статистического приемочного контроля.

Одним из наиболее важных свойств электрических соединителей является эксплуатационная надежность. Это свойство соединителей сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность определяется показателями надежности. Показатель надежности — техническая характеристика, количественным образом определяющая одно из нескольких свойств соединителя. Показатель надежности может иметь размерность (например, среднее время наработки до отказа в часах) или не иметь ее (например, вероятность отказа).

Достоверную оценку показателей надежности электрических соединителей по результатам испытаний можно получить лишь на основе анализа большого объема статистических данных. На практике всегда приходится иметь дело с ограниченными статистическими данными, которые по существу являются величинами случайными. Приближенное, случайное значение показателей надежности, получаемое в процессе испытаний, принято называть оценкой этих показателей. Оценку необходимо выбирать с таким рас-

четом, чтобы даже при сравнительно небольшом объеме статистических данных ошибка от замены точного (вероятностного) значения показателей надежности их оценкой была по возможности малой. Это условие позволяет обеспечить статистические методы испытаний электрических соединителей на надежность.

### Особенности организации испытаний электрических соединителей на надежность

Вопросы организации испытаний, задачи сбора и обработки статистической информации одинаково важны при любых видах испытаний на надежность — определительных, специальных или совмещенных.

При организации испытаний соединителей на надежность необходимо учитывать следующие факторы:

- режим функционирования соединителей в процессе испытаний (непрерывный, циклический и др.);
- характер внешних воздействий (механические, климатические, электрические, комплексные, неразрушающий контроль, разрушающий физический анализ и т. д.);
- объемы сбора и состав фиксируемой информации;
- формы учетно-отчетной документации;
- правила прекращения испытаний;
- состав, обязанности и ответственность контролеров-операторов испытательных подразделений.

От степени проработки и учета указанных факторов при подготовке испытаний зависит достоверность получаемых оценок показателей надежности электрических соединителей.

Рассмотрим содержание вышеуказанных факторов.

#### Режим функционирования

Наиболее полную информацию можно получить при непрерывном контроле процесса испытания, когда фиксируются моменты отказов соединителей. Однако такие условия не всегда можно гарантировать.

Если задан уровень показателей надежности и специально не оговорены соответствующие условия, то при испытаниях необходимо обеспечить наиболее характерные для конкретного вида соединителей условия функционирования.

Периодический контроль обеспечивает фиксацию отказов соединителей в определенные планы испытаний промежутки времени. В интересах статистической обработки результатов испытаний целесообразно заданное или расчетное время испытаний делить на 10–15 контрольных периодов.

#### Характер внешних воздействий

К числу внешних факторов, воздействующих на электрические соединители, относятся:

- повышенная и пониженная температура среды;
- быстрая, постепенная и резкая смена температур;
- повышенная влажность;

- соляной туман;
- солнечная радиация;
- статическая и динамическая пыль;
- повышенное и пониженное атмосферное давление;
- плесневые грибы;
- синусоидальная и широкополосная случайная вибрация;
- механические удары одиночного и многократного действия;
- угловые и линейные ускорения;
- акустические шумы;
- специальные факторы.

Для проведения испытаний на воздействующие факторы используют отечественные комплексы «Климат-6», «Климат-7», «Мороз-5», «Мороз-6», а также международные и зарубежные стандарты качества — МЭК, ИСО, MIL-Std, DIN, BS и другие.

#### Объекты сбора и состав фиксируемой информации

Правильный выбор объектов сбора статистической информации, в особенности для сложных электрических соединителей, является непростой задачей.

При слишком мелком делении электрических соединителей на самостоятельные объекты сбора статистической информации усложняется работа с учетной документацией, что неизбежно ведет к снижению достоверности получаемых результатов. При чрезмерном укрупнении объектов сбора статистической информации может потеряться необходимая детализация информации о причине, месте отказа и о фактической наработке отдельных контактных пар комбинированных соединителей (сигнальных, силовых, радиочастотных и других контактов), направляющих элементов, устройств фиксации и других конструктивных элементов соединителя.

Особенностью статистической оценки показателей надежности электрических соединителей является большой объем сведений, который необходимо фиксировать в каждом случае нарушения функционирования. Поэтому в процессе испытаний на надежность необходимо обеспечить регистрацию следующей информации. Это:

- общая наработка соединителя и время работы от момента предыдущего отказа;
- используемые методы диагностики и контроля;
- место обнаружения отказа;
- заводской и позиционный номер отказавшего элемента, детали, узла;
- причина отказа (поломка, износ детали, отклонение параметра и т. д.);
- условия окружающей среды в момент отказа испытываемого соединителя (температура, вибрация, удары и другие факторы).

Достоверность первичной информации обеспечивается полнотой и регулярностью ее фиксации, а также глубиной и объективностью анализа причин отказов. Следует иметь в виду, что недостоверные первичные данные невозможно скорректировать даже самой тщательной статистической обработкой результатов испытаний.

#### Формы учетно-отчетной документации

Наиболее распространенные учетные документы при испытании на надежность — это журнал испытаний и карточка учета отказов. Журнал испытаний служит оператору-испытателю своеобразным формуляром, в котором в хронологическом порядке отражается состояние электрических соединителей: время и дата начала и окончания испытаний; правильность функционирования; моменты обнаружения отказов и их внешние признаки; время восстановления (поиск и устранение отказов) и т. д. Записи в журнале используются для заполнения карточки учета отказов.

Карточки учета отказов применяются для накопления статистической информации об отказах электрических соединителей по различным признакам, на основании которой разрабатываются мероприятия по повышению надежности конкретных типов соединителей.

Правила прекращения испытаний, состав, обязанности и ответственность операторов испытательных групп указывается в НТД.

#### Качественный анализ отказов и предварительная обработка результатов испытаний соединителей

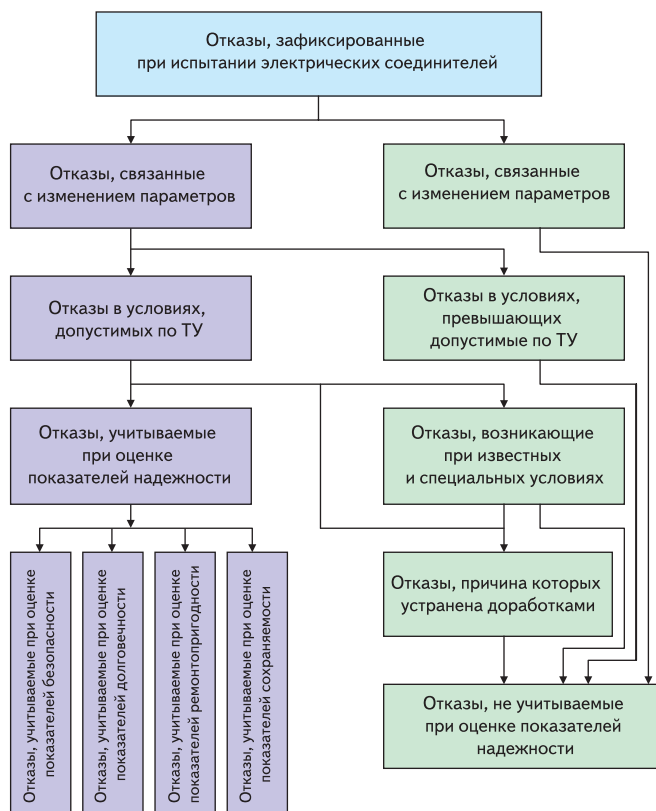
Основные задачи качественного анализа — это объединение и классификация статистической информации, полученной при испытаниях электрических соединителей.

Важным средством увеличения объема статистической информации является объединение сведений об отказах и наработке однотипных соединителей, полученных при различных видах испытаний в течение всего периода их производства. При этом возможность и целесообразность объединения накопленной информации должны быть обоснованы инженерными соображениями.

С точки зрения задач статистической оценки надежности наиболее важными считаются две группы классификации отказов:

- по причинам возникновения;
  - по отношению к оцениваемым показателям надежности.
1. Классификация отказов по причинам возникновения. Здесь выделяются группы отказов:
    - конструктивные;
    - технологические;
    - производственные;
    - эксплуатационные.
  2. Классификация отказов по отношению к оцениваемым показателям надежности. Она предусматривает разделение отказов на «учитываемые» и «не учитываемые». К учитываемым отказам относятся:
    - отказы, вызванные внешними факторами, не предусмотренными НТД на соединители, а также отказы из-за нарушений инструкций по технической эксплуатации;
    - отказы опытных образцов, причины которых устраняются в процессе доработок;
    - отказы, не влияющие на конкретный оцениваемый показатель.

Принцип классификации отказов электрических соединителей по отношению к их по-



**Рис. 1.** Классификация отказов при испытании электрических соединителей

казателям надежности можно представить в виде схемы (рис. 1).

Отметим наиболее характерные ошибки при организации испытаний электрических соединителей на надежность, ошибки при сборе и первичной обработке статистической информации:

- Ошибки при классификации отказов, которые в основном являются следствием неправильной интерпретации тех или иных классификационных признаков в конкретном случае. Например, часто трудно отличить случайное нарушение требований ТУ по эксплуатации персоналом от естественной ошибки, обусловленной несовершенством соединителей или низким качеством технической документации.
- Отклонение от установленных для электрических соединителей регламентных работ и условий эксплуатации. Например, часть регламентных работ не проводилась из-за дефицита времени или отсутствия специалистов соответствующей квалификации. Полученные в этих условиях результаты испытаний, очевидно, могут значительно отличаться от тех, которые были бы получены при установленной системе технического обслуживания.
- Отклонения от установленных для данного типа соединителей правил ремонта (замена контактов, фиксирующих или направляющих элементов и т. д.). Сюда можно отнести: применение случайного инструмента, не предназначенного для восстановления соединителя, нарушение установленной технологии ремонта и технологической документации.

- Исключение из оценки надежности отказов, по которым проведены доработки. Такие отказы можно исключать только в том случае, когда доработка не допускает возможность их появления в принципе.
- Отнесение к учитываемым отказов, не имеющих отношения к оцениваемому показателю надежности. Примерами таких ситуаций могут быть случаи брака соединителей или нарушения в процессе производства из-за отклонений физико-химических свойств сырья или параметров комплектующих. Внешне такие отказы выглядят как нарушения нормальной работы электрических соединителей.

#### **Использование системы контроля качества для достижения высокой надежности электрических соединителей**

Как уже было отмечено, надежность — одно из важнейших свойств электрических соединителей. В этом смысле очень важно учитывать связи, существующие между концепцией всестороннего, комплексного контроля качества и одним из элементов качества — надежностью. Ответственностью за качество электрических соединителей и его обеспечения должны быть проникнуты все организационные структуры современного предприятия. Это требование верно для всех элементов качества, в том числе и для надежности.

Возможные мероприятия по проведению всестороннего контроля качества, с целью получения гарантированного уровня надежности выпускаемых соединителей, можно рассмо-

треть на примере следующих операций. В качестве таких операций возьмем:

- контроль разработки конструкции электрических соединителей;
- входной контроль материалов и комплектующих изделий;
- контроль готовой продукции.

#### **Контроль разработки электрических соединителей**

Сюда входят следующие мероприятия по обеспечению требуемого уровня надежности:

- разработка отраслевого стандарта на надежность согласно НТД на разрабатываемые соединители;
- четкое определение условий эксплуатации на конкретные соединители;
- оптимизация конструкции соединителей для достижения требуемого уровня надежности;
- оценка экономического баланса между надежностью и суммарными затратами на ее достижение;
- выбор таких технологических процессов, с помощью которых можно достичь требуемого уровня надежности;
- проведение испытаний опытных образцов и контрольных партий соединителей для обеспечения заданного уровня надежности;
- модернизация конструкции соединителей и технологических процессов, направленная на устранение в максимально возможной степени всех факторов, влияющих на снижение надежности;
- анализ и регулирование гарантийных обязательств по обеспечению надежности разрабатываемых соединителей;
- сравнение и оценка надежности разрабатываемых соединителей и существующих аналогов данного класса.

#### **Входной контроль материалов и комплектующих изделий**

Эта операция является одной из важнейшей в обеспечении надежности и предусматривает:

- предоставление поставщикам материалов и комплектующих изделий обоснованных требований по надежности их продукции;
- непрерывную оценку надежности материалов и комплектующих изделий;
- оценку возможностей производить электрические соединители с требуемым уровнем надежности с учетом реальной надежности продукции поставщиков;
- оказание технологической помощи поставщикам материалов и комплектующих изделий, предпринимаемой с целью повышения надежности выпускаемых соединителей.

#### **Контроль готовой продукции**

К мероприятиям этой операции можно отнести:

- постоянный контроль соединителей и технологических процессов их изготовления для достижения гарантированного уровня надежности;
- организацию рекламационной работы и обмена информацией между потребителями и изготовителями соединителей;

- удостоверение потребителя в надежности приобретенных соединителей;
- систематическую оценку надежности выпускаемых соединителей при их эксплуатации и транспортировке;
- поддержание достигнутого уровня надежности, осуществляемое на основе разработанных правил и технических инструкций по обслуживанию, эксплуатации и ремонту соединителей;
- оценку характеристик надежности соединителей при их эксплуатации с учетом затрат на ее обеспечение.

Выполнение рассмотренных мероприятий по обеспечению требуемой надежности электрических соединителей позволит на практике обеспечить необходимый уровень заявленного параметра. К сожалению, общий спад промышленного производства в 1990–2000 гг. в России отразился и на качестве изделий электронной техники. В эти годы были практически прекращены фундаментальные, прогнозные, поисковые, научные исследования и разработки в области обеспечения качества и надежности изделий электронной техники, расширение их номенклатуры. Практически перестала действовать система сбора и анализа данных о качестве и надежности РЭА в процессах производства и эксплуатации. Во многом морально и физически устарело технологическое, испытательное и контрольно-измерительное оборудование.

В настоящее время намечилось определенное оживление производства отечественных изделий электронной техники, в том числе и электрических соединителей, возрастают номенклатура и объемы их выпуска.

### Ускоренные испытания электрических соединителей на надежность

Сложность и ответственность задач, решаемых с помощью современной РЭА, предъявляют высокие требования к ее надежности. Так, даже не очень сложная РЭА может содержать до  $10^6$  элементов. При значении интенсивности отказов  $\lambda = 10^{-6}$  1/ч средняя наработка до отказа  $T_{cp}$ , такой аппаратуры будет составлять всего лишь один час, то есть она практически оказывается неработоспособной.

Увеличение технического ресурса —  $t_p$  электронных компонентов, в том числе электрических соединителей с определенными показателями надежности, является актуальной задачей повышения надежности РЭА. Как правило, задаваемая  $\gamma$  — процентная наработка соединителей до отказа ( $T_\gamma$ ) при 99% в предельно допустимых режимах эксплуатации должна быть не менее 20–25 тысяч часов в пределах срока службы ( $T_{сл.}$ ) 20–25 лет.

Для определения соответствия электрических соединителей таким высоким требованиям надежности необходимо проведение испытаний больших объемов выборок. При этом время испытаний и затраты на их проведение увеличиваются.

Перечисленные затруднения являются причиной поиска таких методов, которые позволили бы сократить продолжительность и объ-

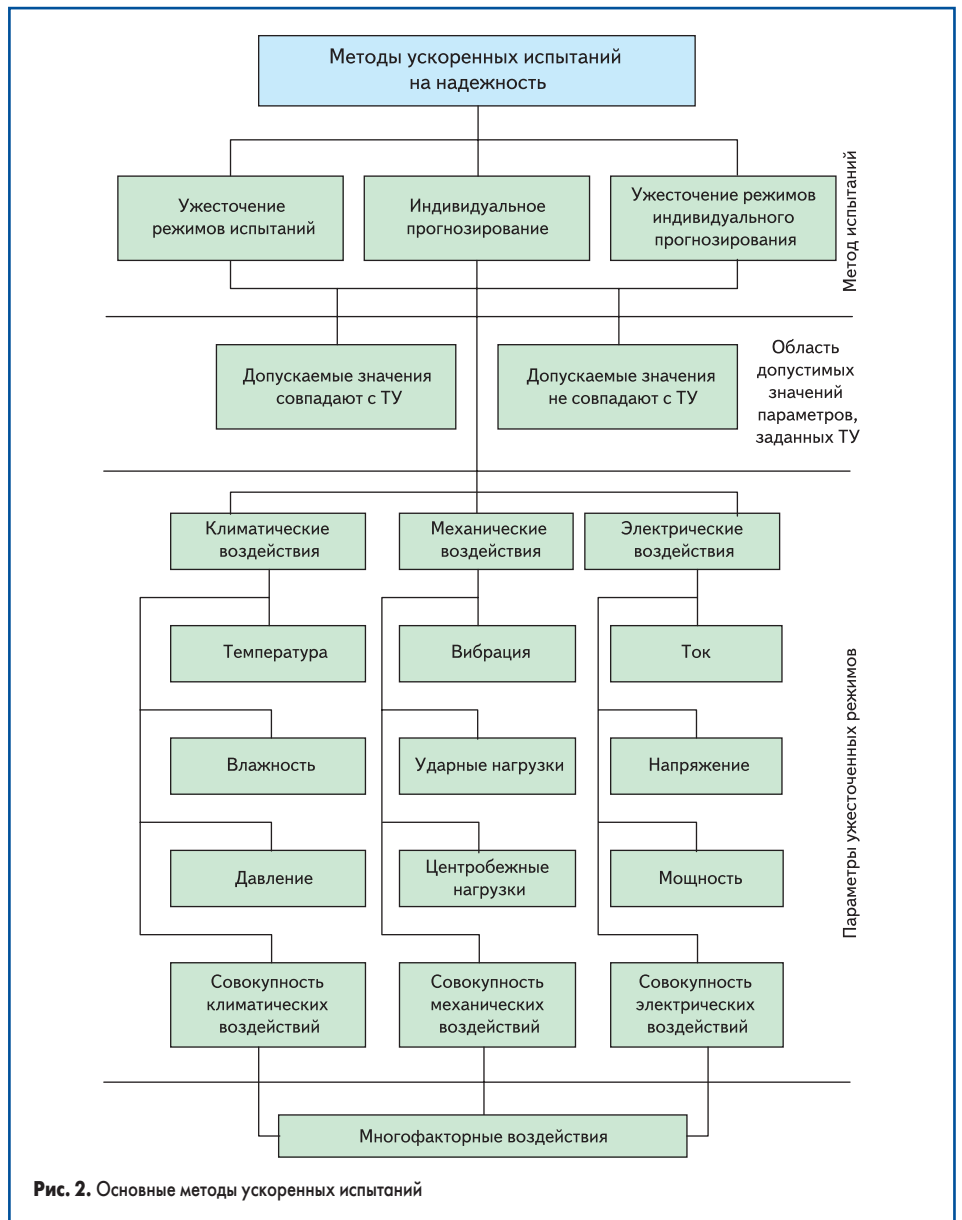


Рис. 2. Основные методы ускоренных испытаний

ем выборки испытаний. Цель ускоренных испытаний — выявить изменение параметров соединителей при сокращении длительности испытаний за счет интенсификации режимов работы и условий их эксплуатации.

В общем случае величину, показывающую, во сколько раз уменьшается значение показателей долговечности или срока сохраняемости при испытаниях, относительно заданных значений показателей долговечности или срока сохраняемости в эксплуатации, называют коэффициентом ускорения испытаний:

$$K_y = t_n / t_y = \lambda_y / \lambda_n \quad (1)$$

где  $t_n, t_y$  — время испытания в нормальном и ускоренном режимах соответственно;  $\lambda_y, \lambda_n$  — интенсивность отказов в указанных режимах.

Ускорение испытаний электрических соединителей обычно достигается ужесточением воздействующих факторов, таких как температура, влажность, электрические, механические и другие нагрузки.

Основной научной проблемой теории испытаний, в том числе и ускоренных, является разработка и исследование моделей электри-

ческих соединителей и процессов их старения и изнашивания. Наиболее часто в качестве модели старения и изнашивания принимают математическую модель в виде однородной или неоднородной марковской цепи. Исходя из модели процессов износа и старения, можно выделить три основных метода ускоренных испытаний (рис. 2).

#### Форсированные испытания

Первый метод, называемый форсированными испытаниями, заключается в ужесточении режимов испытаний.

В этом режиме, как правило, превышаются предельные значения, при которых еще сохраняется нормальная работа электрических соединителей.

Недостатками подобного метода испытаний являются:

- возможность непредвиденного изменения физико-химических процессов старения и износа;
- практическая невозможность числовой оценки корреляции между значениями параметров испытаний в нормальных и ужесточенных режимах;



• невозможность количественных оценок показателей надежности испытуемых соединителей — технического ресурса, времени наработки до отказа, сохраняемости и т. п. В силу этих особенностей первый метод ускорения испытаний можно применять при сравнительных или контрольных испытаниях. Для проведения определительных испытаний этот метод ускорения практически непригоден.

### Временная оценка поведения прогнозируемого параметра

Второй метод ускоренных испытаний основан на временной оценке поведения прогнозируемого параметра.

В данном случае учитывается эволюционная тенденция развития процессов старения и изнашивания и тем самым определяется момент отказа. Для высоконадежных электрических соединителей возможны варианты прекращения испытаний до наступления отказа. В качестве прогнозируемых показателей могут быть показатели качества соединителя или функции этих показателей.

Основными недостатками второго метода ускоренных испытаний являются:

- трудность нахождения прогнозируемых параметров, связанная с учетом одновременно действующих многочисленных факторов;
- ограниченная возможность установления предельно-допустимых режимов функционирования электрических соединителей, что не позволяет с высокой достоверностью прогнозировать моменты их отказа;
- малые значения коэффициентов ускорения, которые лежат в пределах 2,0–3,5.

В силу изложенных особенностей второй метод целесообразно применять для определительных испытаний, а также в случае необходимости разделения соединителей по качественным группам. Кроме того, этот метод применяется при ускоренных неразрушающих испытаниях.

### Совместное применение первого и второго методов

Третий метод ускоренных испытаний заключается в совместном применении первого и второго методов.

Для третьего комбинированного метода ускоренных испытаний характерны следующие недостатки:

- невозможность проведения одновременно испытания нескольких соединителей;
- сложность вычислительных процедур.

При анализе недостатков каждого метода ускоренных испытаний необходимо учитывать, что широкое применение цифровой вычислительной техники в основном исключает все недостатки, связанные с большим объемом вычислений. Для повышения эффективности испытаний на надежность и снижение затрат следует увеличивать объемы вычислений, если они приводят к упрощению и сокращению сроков самих испытаний.

Методику ускоренных испытаний электрических соединителей обычно разрабатывают на основе НТД с учетом специфики функци-

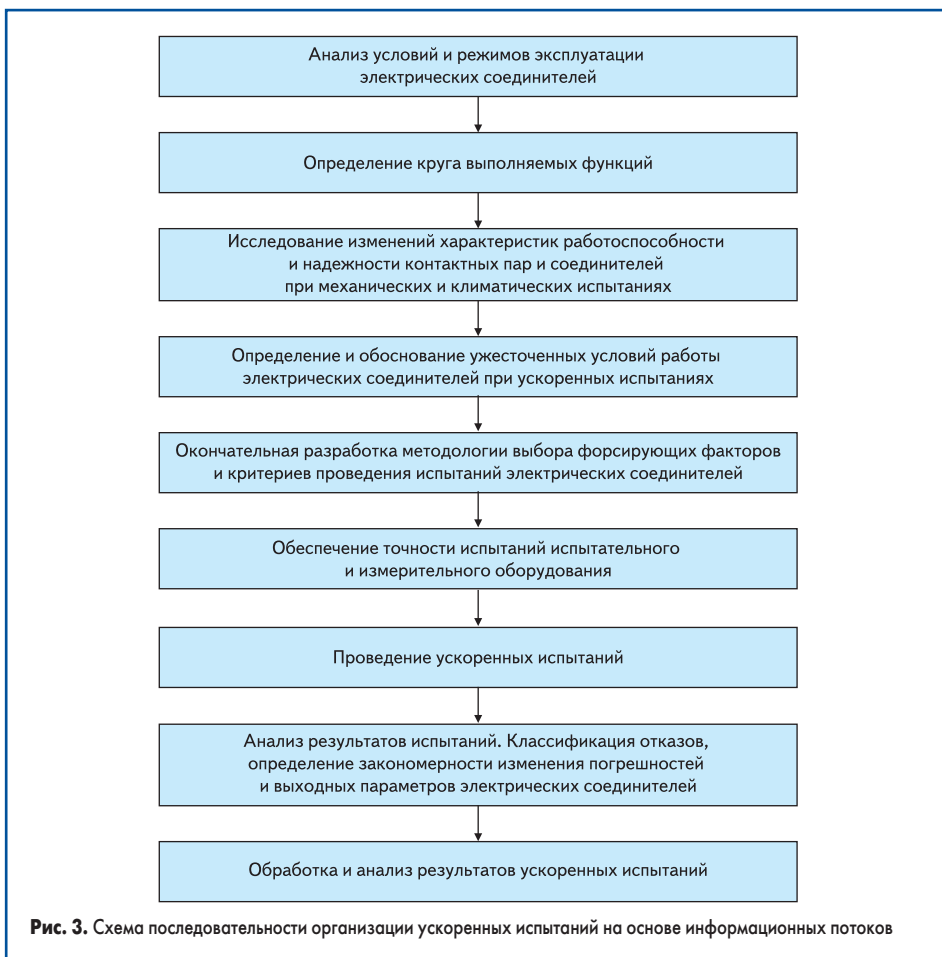


Рис. 3. Схема последовательности организации ускоренных испытаний на основе информационных потоков

Таблица. Типовые условия нормальных и ускоренных испытаний электрических соединителей

Вид испытаний	Параметры испытаний	Режимы		Дополнительные условия	
		Нормальный	Ускоренный		
На виброустойчивость	Диапазон частот, Гц	10–2000	100–5000	По программе испытаний. Под электрической нагрузкой	
	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	1000	1500		
	Продолжительность, ч	3–6	0,3–2,5		
На вибропрочность	Число циклов качания	24–96	4–24	Синусоидальная вибрация во всем диапазоне непрерывно изменяющихся частот. Применяется по согласованию с заказчиком	
	метод качающихся частот	Продолжительность, ч	6–24		2–4
	метод фиксированных частот	Продолжительность, ч	1–6		0,1–1,5
На ударную прочность	одиночные	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	50–1500	80–2000	В каждом из трех направлений. Под электрической нагрузкой
		Длительность удара, м·с	0,05 ± 0,02	0,05 ± 0,02	
	многократные	число ударов	20	10–15	
		Ускорение, м/с <sup>2</sup>	1500	2000	
		Длительность удара, м·с	0,05 ± 0,02	0,05 ± 0,02	
На теплоустойчивость	число ударов	6000	3000	Под токовой нагрузкой	
	Температура, °С	T <sub>max</sub> среды	T <sub>max</sub> + ΔT <sub>ср</sub>		
На влагуустойчивость	Продолжительность, ч	500	100	Испытания без электрической нагрузки	
	Температура, °С	40 ± 2	55 ± 2		
	Относительная влажность, %	93 ± 3	93 ± 3		
	Продолжительность, сутки	21–56	21		

онирования, назначения, условий эксплуатации и конструктивных особенностей соединителей. Производить ускоренные испытания допускается только в технически обоснованных случаях в соответствии с НТД на соединители.

При ускоренных испытаниях необходимо, чтобы критерий распределения отказов во времени и по причинам соответствовал критерию и распределению при нормальных испытаниях на надежность.

Постановка задачи, последовательность организации ускоренных испытаний и выбор параметров воздействующих факторов можно представить в виде схемы (рис. 3).

Форсирование испытаний вновь разрабатываемых и серийно выпускаемых электрических соединителей организуется по этапам:

- Разработка методики выбора форсирующих факторов и форсирующего режима (на основе имеющихся статистических данных) для обеспечения максимально возможного

ускорения испытаний. При этом физическая природа возникновения отказов должна оставаться неизменной.

- Определение интервальных значений коэффициента ускорения при различных внешних воздействующих факторах и нахождение различных законов распределения времени безотказной работы электрических соединителей.
- Определение динамики распределения и выявления причин отказов во время нормальных испытаний (учет принципа наследственности).
- Оценка зависимости между вероятностями безотказной работы в нормальном и форсированном режимах.
- Формирование исходных данных по проведению ускоренных испытаний на надежность. Для окончательного уточнения данных условий и времени форсированных испытаний необходимо учитывать время технологической наработки испытываемых электрических соединителей. Как известно, проведение технологической наработки позволяет выявлять и устранять скрытые дефекты, допущенные в процессе проектирования, производства и испытания. Типовые условия нормальных и ускоренных испытаний электрических соединителей приведены в таблице.

### Условия проведения форсированных испытаний электрических соединителей на надежность

Предположим, что проводятся два испытания  $\Pi_x^0$  и  $\Pi_x^\Phi$  однотипных соединителей с целью оценки количественной характеристики надежности параметров  $x$ .

Испытание  $\Pi_x^\Phi$  считается форсированным относительно испытания  $\Pi_x^0$ , если время испытания в форсированном режиме  $\tau_x^\Phi$  меньше времени  $\tau_x^0$  испытания в нормальном режиме.

Кроме того, должны соблюдаться следующие условия:

- В форсированном режиме  $E_x^\Phi$  испытываемые соединители должны отказывать раньше, чем в нормальном режиме  $E_x^0$ .
- При квалификационных испытаниях  $\Pi_x^0$  и  $\Pi_x^\Phi$  должны быть равны точности результатов, а при контрольных — ошибкам первого и второго рода ( $\alpha^\Phi = \alpha^0$ ;  $\beta^\Phi = \beta^0$ ).

Испытание не считается форсированным, когда сокращение времени  $\tau_x^\Phi$  достигается лишь за счет сокращения объема выборки.

Степень сокращения испытаний на надежность определяется с помощью временного  $K_t$  и нагрузочного  $K_n$  коэффициентов. Временной коэффициент равен отношению:

$$K_t = \tau^0 / \tau^\Phi, \quad (2)$$

где  $\tau^0$  — продолжительность испытания, в течение которого при нормальной нагрузке фиксируется определенное число отказов;  $\tau^\Phi$  — продолжительность испытания, в течение которого при форсированной нагрузке фиксируется то же число отказов.

Отношение числа отказов  $n^\Phi$ , выявленных при форсированных испытаниях за время  $\tau^\Phi$ , к числу отказов  $n^0$ , выявленных при нормальных условиях испытаний за то же время  $\tau^0$ , называется нагрузочным коэффициентом, то есть:

$$K_n = n^\Phi / n^0. \quad (3)$$

Проведение форсированных испытаний связано с необходимостью выбора критерия, с помощью которого можно было бы оценить характеристики надежности в режимах  $E^0$  и  $E^\Phi$ . В качестве такого критерия используется коэффициент подобия, равный:

$$K = T^0 / T^\Phi, \quad (4)$$

где  $T^0$ ,  $T^\Phi$  — средние значения наработки до отказа в условиях нормальных и форсированных испытаний.

В общем случае с увеличением коэффициента подобия  $K$  время испытания уменьшается. Однако пределы изменения коэффициента подобия ограничены.

Необходимо учитывать, что произвольное изменение в широком диапазоне электрических нагрузок, нагрева или охлаждения, механических и других воздействий может привести к изменению физических свойств конструкционных материалов электрических соединителей.

Зависимость коэффициентов подобия от условий и режимов испытаний устанавливаются в процессе предварительных испытаний.

Длительность форсированных испытаний на надежность определяется по формуле:

$$\tau = \tau^0 / K, \quad (5)$$

где  $\tau^0$  — заданное время испытаний в режиме  $E^0$ . В случае экспоненциального распределения среднее время наработки до отказа можно принять равным:

$$T^\Phi = N \times \tau^\Phi, \quad (6)$$

где  $N$  — количество испытываемых соединителей;  $\tau^\Phi$  — наработка соединителей в форсированном режиме до появления первого отказа.

Средняя наработка до отказа  $T^0$  с учетом (6) определяется из зависимости:

$$T^0 = K \times T^\Phi = K \times N \times \tau^\Phi. \quad (7)$$

Форсированные испытания на надежность имеют ряд очевидных преимуществ: можно значительно сократить время и затраты на процесс испытаний. В то же время при практической реализации форсированных испытаний на надежность возникают проблемы, связанные с тем, что для большинства типов электрических соединителей не установлены функциональные зависимости между показателями надежности нормальных и форсированных испытаний.

Важно также иметь в виду, что при форсированных испытаниях существует определенный предел, за которым вступают в силу

факторы, отсутствующие в реальных условиях эксплуатации электрических соединителей. Из-за влияния этих факторов оценка качества соединителей, в том числе и важнейшего их показателя — надежности, полученная при ускоренных испытаниях, может оказаться искаженной или совершенно ошибочной.

### Контроль показателей надежности при заданных планах испытаний

Контроль показателей надежности в процессе испытаний имеет цель обеспечить приемку электрических соединителей с уровнем надежности  $R \geq R_{mp}$  и их браковку при  $R < R_{mp}$ , где  $R_{mp}$  — требуемый уровень надежности соединителей данного типа.

Вероятность приемки соединителей в зависимости от их качества, в том числе и его важнейшего показателя — надежности, оценивается с помощью оперативной характеристики — плана контроля.

На рис. 4 показаны два вида оперативных характеристик плана контроля на надежность: идеальная и реальная.



Рис. 4. Оперативные характеристики плана контроля надежности: 1 — идеальная; 2 — реальная

Получение идеальной оперативной характеристики с уровнем надежности  $R_{mp}$  связано с необходимостью проведения испытаний очень большого объема выборки однотипных электрических соединителей, что практически можно считать недопустимым. На реальной оперативной характеристике указывают уровни приемочного  $R_0$  и браковочного  $R_1$  показателей надежности и соответствующие этим уровням вероятности рисков поставщика  $\alpha$  и заказчика  $\beta$ , соответственно  $\alpha = 1 - L(R_0)$ , а  $\beta = L(R_1)$ .

Соединители с уровнем надежности  $R \geq R_0$  считаются удовлетворяющими техническим требованиям и принимаются. Наоборот, соединители с уровнем  $R < R_1$  неприемлемы и бракуются.

Числа  $R_1$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  определяют точки (а) и (b) реальной оперативной характеристики, что позволяет выбрать план контроля и объем выборки ( $n$ ) при испытании. При этом объем выборки ( $n$ ) является единственным ограничением, не позволяющим произвольно уменьшать риски  $\alpha$  и  $\beta$  и, тем самым, сближать приемочный  $R_0$  и браковочный  $R_1$  уровни.

Размещение интервала  $[R_1, R_0]$  относительно уровня надежности  $R_{mp}$  при  $\alpha = \beta$  должно выбираться с учетом ущербов, наносимых по-

ставщику и заказчику. Наиболее приемлемым является случай, когда ущерб заказчика и поставщика соизмеримы ( $\alpha \approx \beta$ ), а интервал  $[R_1, R_0]$  размещается примерно симметрично относительно уровня надежности  $R_{mp}$ , то есть  $L(R_{mp}) \approx 0,5$ .

Полученные после испытания величины показателей надежности  $\hat{R}_0$  и  $\hat{R}_1$ , как правило, отличаются от запланированных. Значения вероятностей  $\alpha$  и  $\beta$  при планировании испытаний на надежность выбираются заранее с расчетом на наилучший результат, что соответствует условиям:

$$\hat{\alpha} \leq \alpha; \hat{\beta} \leq \beta.$$

В процессе разработки электрических соединителей контроль надежности необходимо проводить как минимум один раз на приемочных испытаниях, по возможности используя также статистику предварительных и проверочных испытаний. При серийном производстве соединителей контроль надежности обычно предусматривается в составе периодических испытаний. Контроль надежности высоконадежных мелкосерийных соединителей целесообразно проводить при типовых испытаниях в случаях изменения конструкции, технологии или применяемых материалов. Основанием для проведения подобного контроля надежности могут служить сведения о ее недостаточном уровне, полученные по результатам каких-либо испытаний или эксплуатации данного типа соединителей. Контроль сложных по конструкции соединителей может быть включен в состав приемно-сдаточных испытаний, поскольку большой объем получаемой статистики и использование расчетно-аналитических методов для контроля показателей надежности позволяют существенно сократить время и затраты на испытания.

### Одноступенчатый контроль показателей надежности типа наработки и вероятности

Рассмотрим контроль показателей надежности для случаев типа наработки и вероятности. Будем считать, что наработка между отказами соединителей имеет экспоненциальное распределение, а продолжительность испытаний ограничивается предельным временем или вероятностью безотказной работы.

Для выбора плана контроля абсолютные значения уровней надежности  $R_0 \equiv T_0$  и  $R_1 \equiv T_1$  несущественны. План контроля определяется лишь их отношениями  $T_0/T_1$  и рисками  $\alpha$  и  $\beta$ . Кроме того, с целью упрощения процесса испытаний приемку или браковку целесообразно проводить не по уровню показателя надежности, а по функционально связанному с ним числу отказов.

В процессе контроля наработки на отказ фиксируется суммарное по всем  $N$  контролируемым образцам соединителей число отказов  $r$ , а также суммарная наработка:

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N t_{Hi}, \quad (8)$$

где  $t_{Hi}$  — наработка  $i$ -го изделия.

План контроля включает в себя: браковочное число отказов —  $r_{бр.}$  и предельную суммарную наработку —  $t_{max}$ . Контроль прекращается, как только будет достигнуто одно из указанных значений.

При условии  $\tau = \tau_{бр.}$  и  $t_{\Sigma} < t_{max}$  результаты испытаний на надежность считаются неудовлетворительными (соединители бракуются). Если  $t_{\Sigma} = t_{max}$ , а  $\tau < \tau_{бр.}$  — соединители принимаются.

Продолжительность испытаний соединителей можно изменять в широких пределах за счет пропорционального изменения контролируемого их числа с единственным условием: обеспечить требуемую суммарную наработку.

### Одноступенчатый контроль показателей надежности типа вероятности

Данный контроль предусматривает проведение  $N$  независимых испытаний, в каждом из которых фиксируется факт наработки времени  $t$ , что дает возможность оценить вероятность  $P(t)$ . Допускается и другой вариант: в выбранный момент времени определяется работоспособность соединителя. После  $N$ -го испытания соединители принимаются, если суммарное число отказов не более заранее вычисленного оценочного норматива  $R_{бр.}$ , а в противном случае бракуются.

Как известно из теории вероятностей, испытания могут проводиться как на одном, так и на  $N$  соединителях, при условии, что независимость опытов будет обеспечена либо за счет полного восстановления отказавшего соединителя к началу очередного испытания, либо за счет разнесения испытаний по времени или по соединителям. Таким образом, план контроля показателей надежности типа вероятности основан на проверке двух чисел —  $N$  и  $r_{бр.}$ .

### Метод последовательных испытаний электрических соединителей на надежность

Метод последовательных испытаний на надежность (последовательный анализ А. Вальда) характерен тем, что число и продолжительность испытаний соединителей на надежность заранее не устанавливается. При использовании этого метода в среднем требуется в 2–3 раза меньший объем выборки по сравнению с испытаниями на выборке фиксированного объема.

Последовательные испытания на надежность соединителей включают проверку двух предположений:

- Первое предположение  $H_0$  состоит в том, что надежность принимаемой партии соединителей соответствует техническим условиям.
- Второе предположение  $H_1$  состоит в том, что надежность принимаемой партии соединителей не соответствует техническим условиям.

Испытания продолжают до тех пор, пока не будет подтверждено одно из двух предположений. Для ряда практических задач ино-

гда оказывается целесообразным усечение последовательных испытаний, несмотря на некоторое увеличение рисков поставщика и заказчика.

Суть последовательных испытаний на надежность заключается в следующем. До начала испытаний задаются вероятности ошибок первого ( $\alpha$ ) и второго ( $\beta$ ) рода. После каждого последовательного наблюдения вычисляется неравенство:

$$\beta/(1-\alpha) \leq P_{0r}/P_{1r} \leq (1-\beta)/\alpha, \quad (9)$$

где  $\beta/(1-\alpha)$ ,  $(1-\beta)/\alpha$  — пороговые значения последовательной процедуры;  $P_{0r} = f(x_r, \Theta_0/H_0) \dots f(x_1, \Theta_0/H_0)$ ;  $P_{1r} = f(x_r, \Theta_1/H_1) \dots f(x_1, \Theta_1/H_1)$  — функции совместных условий плотностей вероятностей непрерывной случайной величины  $x$ ;  $x_i (i = 1, T)$  — реализация случайной величины  $x$ , полученная при  $i$ -ом измерении;  $x = \Theta_0$ ,  $x = \Theta_1$  — математические ожидания случайной величины  $x$  при проверке предположений  $H_0$  и  $H_1$ .

Если случайная величина  $x$  дискретна, то вместо отношения  $P_{0r}/P_{1r}$  условных плотностей вероятностей в неравенстве (9) используется отношение соответствующих вероятностей  $P_0/P_1$ .

Партия соединителей принимается, когда:

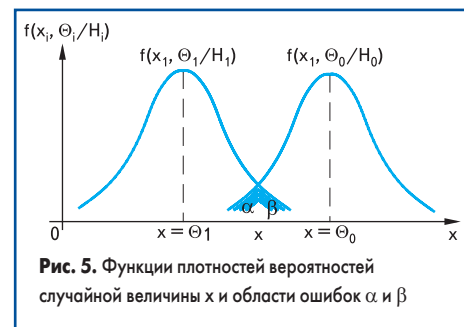
$$P_{0r}/P_{1r} \leq \beta/(1-\alpha), \quad (10)$$

а при условиях:

$$P_{0r}/P_{1r} \geq (1-\beta)/\alpha \quad (11)$$

бракуется.

На рис. 5 показаны функции  $f(x_i, \Theta_0/H_0)$  и  $f(x_i, \Theta_1/H_1)$  для нормального закона распределения случайной величины  $x$  и области ошибок  $\alpha$  и  $\beta$ .



Последовательные испытания на надежность типа наработки и вероятности применимы для любых распределений случайных величин (экспоненциального, Пуассона, Вейбулла, нормального и др.).

Рассмотрим применение метода последовательных испытаний на примерах оценки надежности электрических соединителей с простейшим пуассоновским и нормальным потоками отказов.

### Поток отказов простейший

Обозначим через  $T_0$  и  $T_1$  заданные уровни средних наработок до отказа. В соответствии с законом Пуассона:

$$P_0 = \frac{1}{r!} \left( \frac{t_{\Sigma}}{T_0} \right)^r \times e^{-\frac{t_{\Sigma}}{T_0}}; \quad (12)$$

$$P_1 = \frac{1}{r!} \left( \frac{t_{\Sigma}}{T_1} \right)^r \times e^{-\frac{t_{\Sigma}}{T_1}}; \quad (13)$$

где  $r$  — число отказов электрических соединителей;  $t_{\Sigma}$  — суммарное время наработки ( $r$ ) от казавшихся соединителей.

Отношение вероятностей:

$$\frac{P_0}{P_1} = \left( \frac{T_1}{T_0} \right)^r \times e^{-\frac{t_{\Sigma}}{T_1} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)}. \quad (14)$$

Правую часть (14) подставим в неравенство (9) и получим:

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < \left( \frac{T_1}{T_0} \right)^r \times e^{-\frac{t_{\Sigma}}{T_1} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)} < \frac{1-\beta}{\alpha}. \quad (15)$$

Прологарифмируем неравенство (15) и после некоторых преобразований получим:

$$\left( \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{\beta}{1-\alpha} - r \times \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_1}{T_0} \right) < \frac{t_{\Sigma}}{T_0} < \left( \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{1-\beta}{\alpha} - r \times \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_1}{T_0} \right). \quad (16)$$

Введем следующие обозначения:

$$A = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{\beta}{1-\alpha}; \quad B = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{1-\beta}{\alpha};$$

$$K = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_1}{T_0}.$$

Тогда с учетом принятых обозначений и граничных условий можно записать, что:

$$(A - Kr) < \frac{t_{\Sigma}}{T_0} < (B - Kr). \quad (17)$$

Левая и правая части неравенства (17) представляют собой уравнения двух параллельных прямых, тангенс угла наклона которых равен  $K$  (рис. 6).

В процессе испытания фиксируются две величины: число отказов  $r$  и относительная величина наработки  $t_{\Sigma}/T_0$ .

При попадании результатов в область приемки или область браковки испытания прекращаются. Попадание результатов в область продолжения испытаний является условием продолжения испытаний до принятия одного из предположений —  $H_0$  или  $H_1$ .

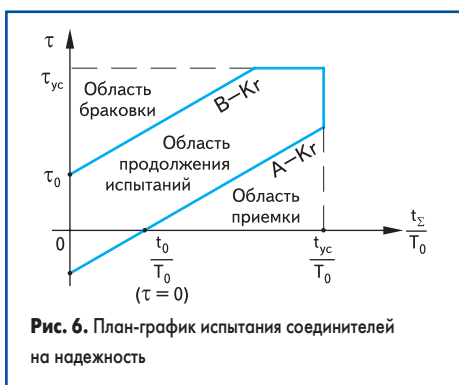


Рис. 6. План-график испытания соединителей на надежность

В процессе испытаний соединителей на случай многократных попаданий на граничные значения прямых ( $A - Kr$ ) и ( $B - Kr$ ), а также в область продолжения испытаний принимается решение о прекращении испытаний. Рекомендуется пользоваться «усеченной» программой испытаний при условии, что:

$$r_{yc} = (1,5 \dots 2,5)r_0. \quad (18)$$

**Поток отказов имеет нормальное распределение**

В процессе испытаний электрических соединителей получены реализации  $x_1, x_2, \dots, x_m$  параметра  $X$ , совместные плотности вероятности которых равны:

$$P_{0m} = \prod_{i=1}^m f(x_i/H_0) = \frac{1}{\sigma(\sqrt{2\pi})^m} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m (x_i - \Theta_0)^2 \right]; \quad (19)$$

$$P_{1m} = \prod_{i=1}^m f(x_i/H_1) = \frac{1}{\sigma(\sqrt{2\pi})^m} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m (x_i - \Theta_1)^2 \right], \quad (20)$$

где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение величины  $x$ ;  $x = \Theta_0, x = \Theta_1$  — математические ожидания случайной величины  $x$ ;  $m$  — число измерений.

При известных до начала испытаний величинах  $\alpha, \beta, \Theta_0, \Theta_1, \sigma$  и нормальном законе распределения отказов электрических соединителей последовательная процедура заключается в проверке неравенства:

$$\left( \frac{\sigma^2}{\Theta_0 - \Theta_1} \ln \frac{\beta}{1-\alpha} + m \frac{\Theta_0 + \Theta_1}{2} \right) < \sum_{i=1}^m x_i < \left( \frac{\sigma^2}{\Theta_0 - \Theta_1} \ln \frac{1-\beta}{\alpha} + m \frac{\Theta_0 + \Theta_1}{2} \right). \quad (21)$$

Обозначим:

$$C = \frac{\sigma^2}{\Theta_0 - \Theta_1} \ln \frac{\beta}{1-\alpha}; \quad D = \frac{\sigma^2}{\Theta_0 - \Theta_1} \ln \frac{1-\beta}{\alpha};$$

$$K' = \frac{\Theta_0 + \Theta_1}{2}.$$

С учетом введенных обозначений и граничных условий неравенство (21) запишем в виде:

$$(C + K'm) \leq \sum_{i=1}^m x_i \leq (D + K'm). \quad (22)$$

Партия изделий считается соответствующей требованиям ТУ по надежности в случае:

$$a_m = \sum_{i=1}^m x_i \leq (C + K'm), \quad (23)$$

и наоборот, при:

$$r_m = \sum_{i=1}^m x_i \geq (D + K'm) \quad (24)$$

партия соединителей отклоняется как не прошедшая испытания на надежность. В теории последовательного анализа число  $a_m$  назы-

вается приемочным, а  $r_m$  — браковочным числом.

Следует заметить, что составление плана испытаний на надежность с использованием последовательных процедур требует тщательных и всесторонних исследований, связанных с учетом специфики технологии производства электрических соединителей, с оценкой законов распределения и пределов изменения их контролируемых параметров.

Необоснованное изменение допусков на контролируемые параметры может привести к значительному увеличению объема выборки и затрат на процесс испытаний.

**Заключение**

Применение статистических методов контроля при проведении испытаний электрических соединителей и обеспечение качества в целом является объективной закономерностью. Развитие математико-статистических методов контроля качества продукции, разработка более совершенных методик оценки показателей качества, применение современной цифровой вычислительной техники позволяют с достаточно высокой степенью точности производить оценку контролируемых параметров изделия. Уменьшение объемов выборок и сокращение времени испытаний, при обеспечении высокой достоверности результатов испытаний, может быть реализовано при использовании статистических методов испытаний. Необходимо отметить и важность использования при анализе результатов испытаний статистических материалов системы сбора и анализа данных о качестве и надежности электрических соединителей в процессе производства и испытаний.

Использование комплексного научного подхода к проведению испытаний, применение современных методик оценки их результатов с учетом экономической эффективности позволит решить эту задачу на достаточно высоком технико-экономическом уровне.

**Литература**

- ГОСТ 27-002 Надежность в технике. Термины и определения. М.: Госкомитет по стандартам, 1983.
- ГОСТ Р ИСО 9001-2001 Система менеджмента качества. Требования Госстандарта России. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
- Митрейкин Н. А., Озерский Д. Н. Надежность и испытания радиодеталей и радиокомпонентов. М.: Радио и связь, 1981.
- Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / Пер. с нем. М.: Мир, 1970.
- Смирнов Н. А. Современные методы анализа и контроля продуктов производства. М.: Металлургия, 1985.
- Сафонов Л. И., Сафонов А. Л. Основные принципы системы менеджмента качества предприятия, выпускающего радиоэлектронные компоненты // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 1.