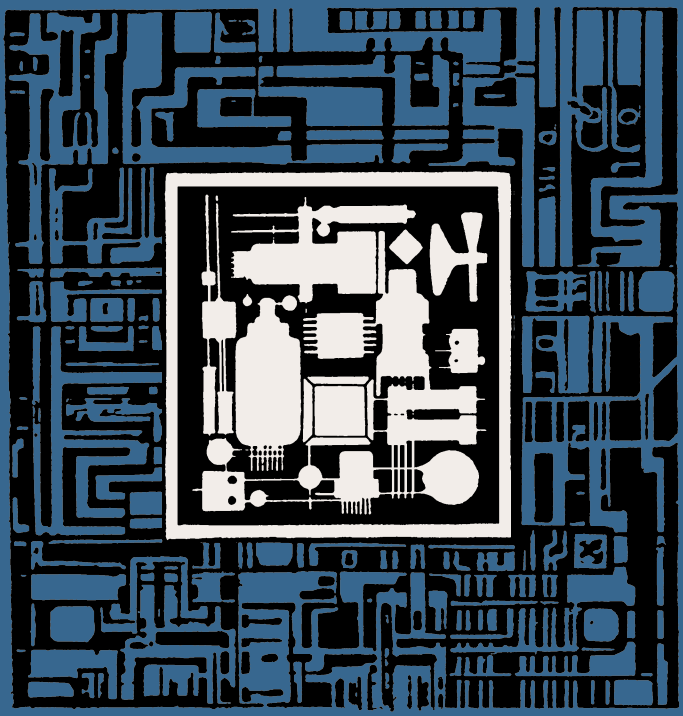
МАССОВАЯ БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА

ЭЛЕКТРОНИКА 12

Э. П. Шмидт

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ



МАССОВАЯ БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА

ЭЛЕКТРОНИКА

Э. П. Шмидт

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

МОСКВА «СОВЕТСКОЕ РАДИО» 1976

Scan AAW

6Ф0.3
Ш73

УДК 621.396.6:65.001.8

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. М. Пролейко (отв. редактор), *К. А. Валиев, В. М. Вальков, А. А. Васенков, Б. Ф. Высоцкий, В. И. Котиков, И. В. Лебедев, Э. А. Лукин, В. П. Лукьянов, А. Ю. Малинин, Ю. Р. Носов, В. Ф. Садов, В. И. Стафеев, В. Н. Сретенский* (зам. отв. редактора), *Ю. Б. Степанов, Г. Г. Татаровская, А. Ф. Трутко, В. Н. Фалатов.*

Редакция литературы по электронной технике

Шмидт Э. П.

Ш 73 Натурные испытания электронных приборов. М., «Сов. радио», 1976.

136 с. с ил. (Массовая библиотека инженера «Электроника»).

Рассмотрены вопросы планирования, выбора условий, методов и средств проведения натурных испытаний и комплексных исследований радиоэлектронных приборов. Приведены эффективные методы обработки и анализа экспериментальных данных и построения физико-математических моделей.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, занимающихся разработкой, изготовлением, испытаниями и применениями радиоэлектронных приборов и аппаратуры. Она может быть полезна также студентам радиотехнических вузов.

Ш $\frac{30407\text{-}075}{046(01)\text{-}76}$ 67а-76 6Ф0.3

© Издательство «Советское радио», 1976 г.

Предисловие

Широкое применение изделий электронной техники (в дальнейшем электронных приборов) в различных отраслях науки и техники предъявляет повышенные требования к их качеству и надежности. Обеспечение высокого качества необходимо не только для создания надежной аппаратуры, но и для повышения эффективности производства самих приборов.

Электронные приборы эксплуатируются, транспортируются и хранятся в различных условиях окружающей среды: от тропиков до Антарктики, от космоса до глубин океана — и на протяжении всего периода использования подвергаются воздействию внешних факторов. В зависимости от типа и интенсивности этих воздействий в материалах и конструкциях электронных приборов могут возникать значительные изменения свойств, приводящие к отказам. Поэтому обеспечение устойчивости электронных приборов к внешним воздействиям и исследования влияния факторов окружающей среды на их параметры и свойства являются одним из важнейших направлений в решении проблемы повышения качества и надежности.

При исследовании влияния факторов окружающей среды на изделия наряду с лабораторными испытаниями и исследованиями важную роль играют натурные испытания, например испытания на самолетах, судах, транспортных средствах, космических объектах, в естественных условиях окружающей среды и т. д.

При натурных испытаниях в естественных условиях окружающей среды изделия подвергаются естественно возникающим воздействиям климатических факторов, что дает возможность выявить комплексное влияние этих факторов на изменение параметров, свойств и механизм отказов изделий при эксплуатации и хранении. Ввиду того, что климатические факторы оказывают значительное влияние на эксплуатационные показатели электронных приборов и других промышленных изделий, в отечественной электронной промышленности и в ряде смежных отраслей, как и в большинстве промышленно разви-

тых стран мира, натурные испытания в естественных условиях окружающей среды получают все более широкое распространение. Для проведения этих испытаний создается сеть специально оборудованных климатических испытательных станций.

В настоящее время актуальной проблемой является организация крупномасштабных исследований влияния климатических факторов на свойства промышленных изделий, базирующихся на проведении натурных испытаний наиболее перспективных изделий в различных климатических зонах СССР, а также в зонах тропического и антарктического климата. Эти исследования направлены на обеспечение заданной климатической стойкости, долговечности и сохраняемости, в частности на разработку методов ускоренной оценки и прогнозирования указанных свойств изделий и способов их защиты, а также на оптимизацию системы климатических лабораторных испытаний.

Для проведения этих испытаний и исследований требуются значительные затраты времени и средств, и поэтому их эффективность может быть обеспечена только при оптимальной организации и планировании.

Вопросы теории и практики натурных испытаний промышленных изделий и проводимых на их основе исследований, имеющие специфические особенности, не нашли достаточно полного и систематического отражения в литературе.

В августе 1975 г. было опубликовано постановление ЦК КПСС, в котором одобрен опыт партийных организаций и коллективов передовых предприятий Львовской области по разработке и внедрению комплексной системы управления качеством продукции. Это стимулирует широкое распространение комплексного, системного подхода к решению проблемы управления.

В предлагаемой работе на основе обобщения десятилетнего опыта организации и проведения исследований влияния климатических факторов на эксплуатационные показатели электронных приборов сделана попытка изложить принципы системного подхода к методологии комплексных исследований и натурных испытаний, которые позволяют сократить временные и материальные затраты при проведении исследований и получить информацию, необходимую для обеспечения заданного уровня качества.

Основное внимание в данной работе уделено комплексному рассмотрению вопросов планирования и проведения многоцелевых исследований, обработки и анализа их результатов, выбора условий, методов и средств натурных испытаний электронных приборов. При этом, однако, имелось в виду, что рассматриваемые общие положения и методологические принципы могут применяться при исследованиях и натурных испытаниях широкого круга промышленных изделий.

Последовательность изложения материала, по возможности, соответствует его использованию в практической работе.

В гл. 1 с позиций системного подхода сформулированы основные направления и цели, определены внешние и внутренние информационные и управляющие связи комплексных исследований в рамках единой системы управления качеством. Приведены основные принципы рационального применения методов и средств исследований и планирования экспериментов.

В гл. 2 на основе рассмотрения системы «климатические факторы — электронные приборы» приведен анализ особенностей воздействия климатических факторов в естественных условиях окружающей среды и механизма отказов электронных приборов, вызванных этими факторами.

В гл. 3 на базе анализа требований к электронным приборам и классификации условий их применения даны рекомендации по выбору условий и режимов натурных испытаний, а также общие требования к составу, оборудованию и размещению климатических испытательных станций.

Основные принципы выбора номенклатуры и количества изделий, средств измерений и контроля, определения последовательности, методов и порядка проведения натурных испытаний как единой системы, направленной на выполнение основных целей исследований, изложены в гл. 4.

В гл. 5, исходя из концепции последовательного планирования эксперимента, приведены основные положения по выбору и применению различных, в том числе статистических, методов обработки экспериментальных данных, необходимых и достаточных для оперативной оценки результатов испытаний и выполнения основных целей исследований.

В гл. 6 изложены направления, алгоритм и методы комплексного анализа результатов экспериментов, основанные на сравнительной, в том числе статистической, оценке условий и результатов испытаний и комплексном применении физико-технических, химических и других методов исследований характера процессов и причин отказов электронных приборов при воздействии климатических факторов.

Гл. 7 посвящена применению теории подобия и статистических методов при построении физико-математических моделей изменения свойств и параметров электронных приборов в естественных условиях. Описана рациональная последовательность построения моделей и применения методов корреляционно-регрессионного и дисперсионного анализа для оценки и анализа их параметров и свойств. Приводятся программы вычислений с помощью ЭВМ и методики построения наиболее распространенных моделей.

Настоящая работа является первым опытом обобщения широкого круга проблем, связанных с исследованиями влияния климатических факторов на эксплуатационные показатели изделий, и, естественно, не лишена недостатков. Многие вопросы, затронутые в ней, нуждаются в дальнейшей разработке. Поэтому критические замечания по содержанию книги автором будут приняты с благодарностью.

Автор выражает глубокую благодарность докт. техн. наук В. Е. Зоткину, кандидатам техн. наук И. Е. Гагену, Г. В. Козловой, В. М. Кулакову, А. Т. Чернову, а также Г. В. Ласточкину, Э. А. Шапковой и коллективу сотрудников, многолетняя совместная работа с которыми сделала возможным написание этой книги.

Особую признательность автор хотел бы выразить докт. техн. наук, проф. В. Н. Сретенскому за весьма существенные замечания, сделанные им при рецензировании книги, которые во многом способствовали улучшению ее содержания.

1. Методология комплексных исследований и натурных испытаний

1.1. Задачи и направления исследований влияния окружающей среды на эксплуатационные показатели электронных приборов

Ввиду того, что долговечность, сохраняемость и климатическая стойкость относятся к основным показателям надежности и качества электронных приборов, в последние 15—20 лет оценка и исследования этих показателей в различных условиях эксплуатации и хранения производятся в широких масштабах [1—5]. Определилось три основных направления испытаний и исследований [6].

Первое направление — оценка устойчивости электронных приборов к воздействию факторов окружающей среды, технического уровня производства и определение показателей надежности с помощью системы лабораторных испытаний. Требования, нормы и методы этих испытаний регламентированы отечественными и международными стандартами и унифицированы в рамках международных организаций МЭК и СЭВ [7—9].

При лабораторных испытаниях изделие подвергается более интенсивному, чем в реальных условиях, воздействию одного или нескольких искусственно созданных факторов окружающей среды. Это позволяет сократить время испытаний и производить ускоренную оценку качества изделий и пригодности их для применения в различных условиях. Однако эти испытания условны: они в большинстве случаев не воспроизводят длительные процессы деградации, протекающие в электронных приборах в реальных условиях применения, где на приборы воздействует одновременно комплекс различных факторов, непрерывно и случайно меняющихся во времени.

Кроме того, благодаря внедрению в промышленность системы лабораторных испытаний и других мероприятий стойкость и надежность электронных приборов значительно возросли, что не позволяет стандартными методами в рамках существующих норм и режимов определить

соответствие характеристик некоторых классов приборов растущим требованиям, выявить их ненадежные узлы и отказы.

До настоящего времени в большинстве случаев не удалось установить соотношения между стандартными режимами лабораторных испытаний и результатами эксплуатации и хранения приборов, что делает эти испытания не пригодными для обоснованного прогнозирования эксплуатационных показателей ускоренными методами.

Все это вызывает необходимость совершенствования системы и методов лабораторных испытаний и повышения их информативности.

Вторым направлением определения основных эксплуатационных показателей является обобщение опыта эксплуатации и хранения в составе аппаратуры, позволяющее получить некоторые сведения об отказах электронных приборов в реальных условиях применения. Однако из сферы применения часто поступает недостаточно полная и достоверная информация, так как практически не всегда удается выявить причины и механизм отказов, определить условия и режимы работы и измерить рабочие параметры электронных приборов в составе аппаратуры.

В последние 10—12 лет в связи с ростом требований к срокам службы и сохраняемости электронных приборов проводятся их длительные испытания на сохраняемость и долговечность, соответствующие по времени гарантийным срокам, установленным нормативно-технической документацией. Это *третье направление* испытаний и исследований, результаты которых позволяют установить количественные показатели долговечности и сохраняемости, уточнить нормы на допустимые изменения параметров — критериев годности, а также разработать рекомендации по повышению надежности и способам защиты электронных приборов от внешних воздействий.

В то же время опыт показал, что информативность длительных испытаний по определению основных эксплуатационных показателей надежности низка, так как требуемые сроки хранения и ресурс приборов значительно превышают период совершенствования технологии производства и поэтому полученные в результате испытаний данные, как правило, не пригодны для оперативного управления качеством. Кроме того, при проведении указанных испытаний существующими методами часто не

удается выявить механизм процессов, приводящих к отказам электронных приборов во времени, что необходимо для разработки методов прогнозирования их долговечности и сохраняемости.

Таким образом, описанные выше направления испытаний и исследований имеют общий недостаток — они, как правило, не позволяют оперативно получать и использовать информацию о физике отказов и механизме процессов деградации параметров, возникающих в электронных приборах при воздействии факторов окружающей среды в реальных условиях эксплуатации и хранения.

В то же время на современном этапе развития электронной техники в связи с ростом требований по долговечности и сохраняемости изучение механизма процессов и физики отказов, т. е. физических основ надежности, является основой успешного решения проблемы обеспечения заданных эксплуатационных показателей электронных приборов [1, 10]. Так, исследования механизма воздействия факторов окружающей среды на развитие физико-химических процессов, определяющих эксплуатационные показатели, дают возможность сделать правильный выбор материалов и покрытий, конструктивных и технологических средств защиты, предельных режимов и условий применения электронных приборов, т. е. позволяют при разработке и производстве заложить необходимую и возможную долговечность и сохраняемость. Кроме того, эти исследования в различных условиях применения создают базу для разработки научно обоснованных методов контрольных испытаний, а также методов ускоренной оценки и прогнозирования эксплуатационных показателей, соответствующих реальным условиям эксплуатации и хранения.

Поэтому в свете современных требований актуальной задачей является организация специальных работ, дающих возможность наряду с оценкой эксплуатационных показателей и применимости электронных приборов проводить всестороннее изучение причин и механизма отказов и разрабатывать способы их предупреждения, обнаружения, устранения и прогнозирования.

Совместное изучение различных аспектов проблемы обеспечения качества электронных приборов может быть выполнено только комплексно по единой программе, включающей совокупность исследований:

— факторов окружающей среды, воздействующих при эксплуатации и хранении;

— эксплуатационных показателей в различных условиях применения;

— способов постоянной и временной защиты от внешних воздействий и методов повышения стойкости;

— причин и механизма отказов при испытаниях и применении;

— методов ускоренной оценки и прогнозирования эксплуатационных показателей, а также путей совершенствования существующих методов и системы испытаний.

Для эффективного выполнения поставленных задач по обеспечению заданного уровня качества программа работ должна предусматривать сочетание перечисленных выше исследований с разработкой эффективных способов защиты, мероприятий по повышению стойкости электронных приборов, а также справочных данных и критериев оценки эксплуатационных свойств.

Кроме того, следует проводить разработку методов ускоренной оценки и прогнозирования долговечности и сохраняемости, совершенствование существующих методов испытаний, требований к электронным приборам и условиям их применения.

Комплексные исследования должны охватывать все этапы формирования качества электронных приборов, а их организация должна обеспечивать оперативное поступление информации для внедрения результатов работ через систему управления качеством [11].

Совокупность комплексных исследований и мероприятий по оперативному внедрению их результатов является наиболее эффективным средством обеспечения заданных эксплуатационных показателей электронных приборов, так как способствует концентрации усилий на решении главных проблем, сокращению объема и стоимости работ и снижению затрат при разработке, производстве, испытаниях и применении электронных приборов.

1.2. Системный подход к организации и проведению комплексных исследований и натурных испытаний

При организации комплексных исследований ввиду их специфических особенностей возникают значительные проблемы. Одна из них обусловлена тем, что электрон-

ные приборы при стационарной эксплутации и хранении подвергаются воздействию различных климатических факторов, электрических нагрузок и других дестабилизирующих факторов, которые вызывают в материалах и конструкциях приборов различные по характеру физико-химические процессы, приводящие к ухудшению параметров и отказам.

В общем случае зависимость интенсивности и механизма отказов электронных приборов от внешних факторов и внутренних процессов является сложной функцией случайных переменных. Попытки теоретического изучения этой зависимости наталкиваются на непреодолимые трудности ввиду значительной сложности определения функциональных связей между эксплуатационными показателями приборов, характером и скоростью протекания процессов деградации и воздействующими факторами окружающей среды, которые их вызывают. Поэтому при изучении механизма отказов, изменения параметров и свойств электронных приборов необходимо сочетание теоретического анализа и экспериментальных методов исследований.

Ввиду комплексного характера воздействия климатических факторов в реальных условиях и многообразия процессов, вызываемых ими в электронных приборах, экспериментальные исследования необходимо проводить с помощью совокупности натурных и лабораторных испытаний, при которых могут быть выявлены и сопоставлены реакции приборов на действие единичных факторов и их реальных сочетаний.

Другая проблема состоит в том, что при исследованиях влияния климатических факторов на эксплуатационные показатели и механизм отказов электронных приборов изучению подлежат различные физические, физико-химические, электрические, метеорологические и другие явления, характеризуемые случайными величинами.

Поэтому указанные исследования должны выполняться коллективом специалистов различного профиля с применением комплекса физических, физико-технических, физико-химических, метрологических, статистических и других методов, а также соответствующих приборов и оборудования, необходимых для проведения экспериментов и всестороннего (качественного и количественного) анализа их результатов.

Рациональное использование методов и средств является важной проблемой, во многом определяющей не только эффективность исследований, но часто и возможность их проведения вообще.

Комплексные, многоцелевые исследования сохраняемости и долговечности электронных приборов, механизма и кинетики физико-химических процессов, протекающих в них при длительном воздействии климатических факторов, требуют значительных затрат. Поэтому важной задачей является получение максимального объема необходимой информации при минимальных затратах времени и средств на проведение работ.

Перечисленные сложные проблемы могут быть решены только при оптимальной организации и планировании комплексных исследований.

По характеру задач, сложности и количеству выполняемых функций, применяемых методов и средств, наличию большого числа взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов и информационных потоков, направленных на выполнение комплекса целей, описываемые исследования можно рассматривать как «большую» сложную систему [11—13] и применять системный комплексный подход к ее проектированию.

Системный подход при проектировании больших систем позволяет до начала работ определять взаимосвязь между необходимыми методами и средствами исследований, их этапами и частями и разрабатывать стратегию оптимального планирования экспериментов, обеспечивающую рациональное применение комплекса методов, средств и действий, направленных на выполнение поставленных целей [12, 13].

Остановимся на основных положениях проектирования системы комплексных исследований.

При проектировании рассматриваемой системы на основании анализа состояния проблемы в целом, требований к электронным приборам, условий применения и предварительной информации об их стойкости следует сформулировать цели комплексных исследований, определить их общую структуру как системы, а также установить внутренние связи между этапами этой системы и ее внешние связи в рамках единой системы управления качеством.

Далее производится планирование экспериментов, т. е. выбор контролируемых переменных, оптимальных

условий, режимов и последовательности испытаний и измерений, выбор методов и процедур обработки и анализа результатов, а также средств проведения экспериментов.

Наиболее эффективным является последовательное, поэтапное планирование и проведение работ и использование на каждом этапе, в зависимости от объема информации и целей исследований, необходимого и достаточного комплекса методов, средств и процедур, обеспечивающего максимальное количество требуемой информации и в то же время сокращение объема и стоимости работ.

Важнейшей особенностью проектирования рассматриваемой системы является необходимость организации и проведения исследований одновременно в нескольких направлениях для комплексного выполнения совокупности целей. Как было показано в § 1.1, основными целями системы комплексных исследований являются разработка:

— критериев оценки эксплуатационных свойств электронных приборов и их стойкости к внешним воздействиям;

— эффективных способов защиты от внешних воздействий и повышения стойкости, долговечности и сохраняемости;

— справочных данных о долговечности и сохраняемости в различных условиях применения;

— методов ускоренной оценки и прогнозирования долговечности и сохраняемости.

Кроме того, должны проводиться работы с целью совершенствования существующих методов лабораторных испытаний, оптимизации требований по долговечности, сохраняемости и условиям применения электронных приборов.

Эффективность комплексных исследований во многом зависит от организации внешних информационных и управляющих связей, объединяющих рассматриваемую систему с другими частями единой системы управления качеством [11].

Внешние информационные связи должны обеспечивать получение необходимой для исследований информации из сферы разработки, производства, испытаний и применения электронных приборов, а также оперативное поступление информации о результатах исследований

для эффективного управления качеством на всех этапах его формирования и поддержания.

Через внешние управляющие связи должно осуществляться внедрение результатов комплексных исследований в промышленность с помощью стандартизации требований и методов испытаний электронных приборов, издания справочников по надежности и проведения мероприятий по усовершенствованиям и способам защиты приборов.

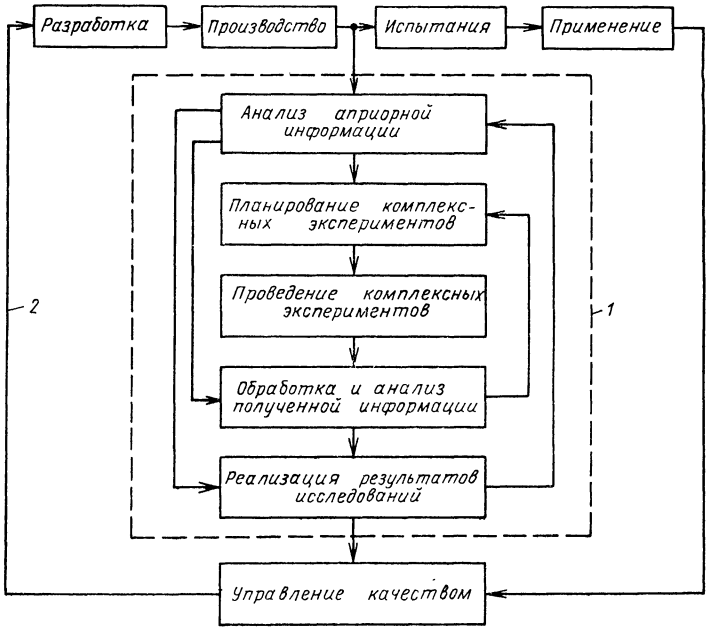


Рис. 1. Структурная модель системы комплексных исследований как части (*1*) системы управления качеством (*2*).

Очевидно, организацию и планирование комплексных многоцелевых исследований можно осуществить только на основе четко разработанной структурной модели, предусматривающей и обеспечивающей целенаправленное выполнение отдельных этапов работ.

В соответствии с принципами системного подхода структурная модель комплексных исследований должна описывать последовательность действий, направленных на выполнение основных целей, устанавливать связи

между всеми этапами работ и давать представление о системе в целом [13].

Опыт показал, что наиболее эффективной является структурная модель, представленная на рис. 1 и предусматривающая следующие этапы исследований:

1-й этап — анализ априорной информации;

2-й этап — планирование комплексных экспериментов;

3-й этап — проведение комплексных экспериментов;

4-й этап — обработка и анализ полученной информации;

5-й этап — реализация результатов исследований.

Как показано на рис. 1, комплексные исследования объединены внешними связями с единой системой управления качеством, а их этапы имеют внутренние логические и информационные связи.

Внутренние логические связи комплексных исследований предопределяют последовательное, поэтапное их проведение, а информационные связи обеспечивают необходимую циклическую циркуляцию потоков информации между отдельными этапами системы.

Таким образом, модель предусматривает проведение работ по определенному циклу, включающему предварительный анализ, планирование, эксперимент и последующий анализ, что отвечает принципам оптимального планирования исследований [14, 15]. Предлагаемая модель описывает структуру системы в целом, однако следует учитывать, что в рамках каждого этапа должен проводиться свой комплекс исследований.

Так, первый этап — это по существу теоретические исследования, которые заключаются в целенаправленном поиске, классификации, обработке, и анализе информации из многочисленных и разнообразных источников и заканчиваются разработкой предварительных выводов по основным направлениям комплексных исследований.

От объема, направленности и тщательности проведения этого этапа во многом зависит эффективность исследований в целом, оперативное выполнение отдельных задач и рациональное планирование комплексных экспериментов.

Поэтому необходимо, чтобы предварительный анализ проводился по определенному алгоритму, охватывал основные цели комплексных исследований и наиболее полно использовал имеющуюся информацию.

Опыт показал, что на первом этапе комплексных исследований целесообразно проводить анализ и классификацию:

— условий применения (эксплуатации и хранения) электронных приборов;

— требований к эксплуатационным характеристикам и условиям применения;

— дестабилизирующих факторов и особенностей их воздействия;

— результатов испытаний и применения электронных приборов;

— материалов и конструкций, функционального назначения и технологии изготовления;

— причин и видов отказов электронных приборов при их испытаниях и применении;

— данных о влиянии дестабилизирующих факторов на механизмы отказов, параметры и свойства электронных приборов;

— метрологических характеристик средств измерений и контроля.

При проведении анализа важную роль играет рациональное использование имеющейся информации. Например, благодаря проведению в последние 10—12 лет различных исследований и испытаний в направлениях, указанных в § 1.1, к настоящему времени для большинства типов электронных приборов имеются данные о результатах лабораторных испытаний и исследований, испытаний на долговечность и сохраняемость, результатах эксплуатации и хранения, о причинах и видах отказов и другие данные.

Следовательно, при проведении предварительного анализа для конкретных типов приборов можно использовать результаты выполненных ранее испытаний аналогичных или рассматриваемых типов приборов, их конструкций и узлов, а также материалов и покрытий, применяемых при их изготовлении.

Кроме того, существуют другие источники информации, которые необходимо использовать при анализе, например данные метеорологических наблюдений, метрологические характеристики средств измерений и т. д.

Естественно, что информация о результатах разрозненных исследований и испытаний, часто проводимых с ограниченными целями, и другая, «неупорядоченная» информация, получаемая из различных источников, нуж-

дается в классификации и обработке. Трудность классификации, обработки и анализа результатов, так называемых пассивных экспериментов и исследований заключается в том, что информация содержит разнородные статистические данные, различные физические, химические, метрологические, электрические, метеорологические характеристики и т. д., причем в различных источниках информация представлена в различной форме и обработана различными методами.

Поэтому при анализе априорной информации необходимо применять методику, позволяющую в зависимости от объема, качества и содержания информации рационально использовать различные метрологические, логические и статистические операции, обеспечивающие проведение анализа в нескольких направлениях, указанных выше, с минимальными затратами времени и средств.

Наиболее целесообразным в данном случае является системный подход к проведению анализа, заключающийся в использовании комплекса методов и рациональной последовательности действий.

Комплексное применение различных методов обработки и анализа дает возможность оценить и эффективно использовать разнообразную информацию, а последовательное планирование процедур и операций обеспечивает рациональное применение этих методов в зависимости от объема имеющейся информации, направлений и целей анализа.

В зависимости от объема информации ее обработку и анализ необходимо проводить поэтапно: сначала качественными, а затем количественными методами, основные из которых изложены в гл. 5 и 6 настоящей книги.

Последовательное планирование позволяет принимать решения о направлении и объеме дальнейших работ, а в некоторых случаях о том, что их проводить не следует.

Так, при проведении анализа данных о влиянии внешних факторов на параметры и свойства электронных приборов первоначально необходимо определить, насколько существенно влияют климатические факторы, электрические нагрузки, время и другие дестабилизирующие факторы на эксплуатационные характеристики рассматриваемых приборов, их аналогов или на материалы, из которых они изготовлены.

В отдельных случаях анализ априорных данных может привести к достаточно обоснованному выводу о том, что климатические и другие дестабилизирующие факторы не оказывают существенного влияния на эксплуатационные характеристики некоторых типов электронных приборов, а причинами их отказов является несовершенство конструкции и технологии изготовления, т. е. как бы врожденные дефекты. Очевидно, тогда нецелесообразно проводить сложные и дорогостоящие эксперименты для изучения влияния внешних факторов на данные типы приборов, а необходимо на основе полученной оперативной информации подготавливать мероприятия по устранению обнаруженных дефектов и осуществлять их в рамках системы управления качеством при разработке и производстве приборов.

Целенаправленный поиск, обработка и анализ априорной информации могут в некоторых случаях даже без проведения дальнейших исследований обеспечить необходимые данные для выработки заключений об эксплуатационных характеристиках, видах и причинах отказов, наиболее ненадежных узлах электронных приборов, стойкости материалов и покрытий, условиях применения, особенностях воздействия факторов окружающей среды и т. д.

Поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы уже по результатам первого этапа комплексных исследований можно было проводить следующие работы:

— уточнять требования к электронным приборам по долговечности и сохраняемости и условиям их применения;

— разрабатывать предложения по устранению дефектов производства, выявленных при предыдущих испытаниях и эксплуатации;

— разрабатывать мероприятия по повышению стойкости материалов, покрытий, узлов и электронных приборов в целом, а также способы их защиты от внешних воздействий;

— обобщать данные об эксплуатационных характеристиках электронных приборов;

— получать данные, необходимые для дополнения и уточнения результатов последующих экспериментальных исследований.

При наличии достаточных данных выполнение указанных работ на базе предварительного анализа дает

возможность оперативно влиять на уровень качества электронных приборов, оптимизировать требования к ним и условия их применения, не проводя дальнейших исследований в этих направлениях.

При недостаточном объеме информации предварительные выводы, сделанные на первом этапе комплексных исследований, позволяют разработать наиболее рациональную стратегию и методику дальнейших работ, так как выявляют, какие данные должны быть получены с помощью комплексных экспериментов и сопоставлены с априорными данными для разработки окончательных выводов и выполнения основных целей исследований. В этом случае комплексные эксперименты служат источником дополнительной информации, необходимой для проверки и уточнения предварительных выводов.

С другой стороны, ввиду крайне ограниченного объема априорной информации о механизме отказов электронных приборов при воздействии внешних факторов в различных условиях применения комплексные эксперименты являются основным средством их изучения. Поэтому анализ априорной информации часто может дать только весьма приближенные сведения. Однако в целях эффективного планирования экспериментов необходимо проводить тщательный анализ имеющихся теоретических и экспериментальных данных для предварительного определения:

— основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на параметры и свойства электронных приборов;

— характера основных физико-химических процессов, приводящих к отказам;

— параметров, наиболее подверженных изменению при воздействии внешних факторов.

Эти специфические требования, предъявляемые к анализу, обусловлены тем, что при планировании и организации комплексных экспериментов важную роль играют данные о влиянии факторов окружающей среды на электронные приборы и сведения об ожидаемых процессах деградации их параметров и свойств.

Кроме того, для правильного планирования комплексных экспериментов необходим предварительный анализ метрологических характеристик, средств измерения и контроля, метеорологических данных, требований к элек-

тронным приборам и условиям их применения, а также анализ материалов и конструкций электронных приборов и их функционального назначения.

Таким образом, анализ априорной информации неразрывно связан со вторым этапом исследований — планированием комплексных экспериментов — и является его основой.

По существу, главная цель комплексных экспериментов — выявление функциональной связи между основными дестабилизирующими факторами внешней среды, физико-химическими процессами, протекающими при их воздействии в материалах и покрытиях электронных приборов, и изменениями параметров и свойств приборов, вызванными этими процессами. Эта связь может быть установлена с помощью тщательного планирования совокупности различных экспериментальных исследований и испытаний.

При планировании комплексных экспериментов на основе анализа априорной информации необходимо определить:

— основные цели экспериментов;

— условия и режимы испытаний;

— номенклатуру испытываемых электронных приборов и измеряемых параметров;

— необходимый уровень метрологического обеспечения;

— методы измерений и контроля;

— методы обработки и анализа экспериментальных данных;

— виды испытаний.

Как было показано выше, цели экспериментов следует определять исходя из того, насколько имеющаяся информация позволяет выполнить общие цели комплексных исследований.

Выбор условий и режимов должен базироваться на анализе условий и результатов эксплуатации и испытаний, а также на анализе требований, предъявляемых к электронным приборам. Такой предварительный анализ дает возможность ограничить объем длительных и дорогостоящих экспериментов. В результате испытаниям будут подвергаться только изделия с недостаточно высокими эксплуатационными показателями, причем в тех условиях, где влияние дестабилизирующих факторов на эти показатели наиболее интенсивно.

Выбор номенклатуры испытываемых изделий также является важным вопросом. На основании теории подобия и предварительного анализа влияния дестабилизирующих факторов на свойства изделий имеется возможность рассмотреть всю номенклатуру электронных приборов с точки зрения степени общности или различия физических процессов деградации, вызванных воздействием этих факторов. В рамках комплексных исследований достаточно испытывать только «типичные представители» групп приборов. Это позволяет сократить номенклатуру испытываемых изделий без существенного снижения достоверности результатов и выбрать оптимальные контрольно-измерительные средства для измерения параметров и диагностики отказов, что, в свою очередь, уменьшает объем и стоимость исследований и испытаний.

Выбор измеряемых параметров также следует проводить на основе анализа предварительной информации о влиянии на них дестабилизирующих факторов. При этом измерениям в первую очередь должны подвергаться параметры, наиболее чувствительные к внешним воздействиям.

Метрологическое обеспечение комплексного эксперимента заключается в выборе и поддержании на заданном уровне точности измерительных средств, необходимых для проведения исследований. Выбор метрологического обеспечения следует проводить на основе вероятностной оценки зависимости между обобщенными показателями эксплуатационных свойств изделий, допусками на параметры изделия и погрешностью измерительных средств.

Методы измерений и контроля следует выбирать исходя из специфики испытываемых приборов, причем необходимо комплексно применять методы измерения электрических параметров и метеорологических факторов, методы неразрушающего контроля, физические и физико-химические методы разрушающего контроля и измерений.

Единая система анализа и обработки результатов комплексных экспериментов должна обеспечивать получение необходимой информации об изменениях параметров, интенсивности отказов изделий, интенсивности, длительности и повторяемости воздействия дестабилизирующих факторов в различных условиях испытаний для того, чтобы установить связь между изменяющимися

дестабилизирующими факторами, механизмом их воздействия на изделия и изменением свойств приборов. При этом следует установить степень соответствия между результатами испытаний в различных климатических условиях. Кроме того, обработка результатов должна обеспечивать получение справочных материалов о долговечности, сохраняемости и стойкости изделий к воздействию дестабилизирующих факторов. Информацию необходимо кодировать в виде, удобном для обработки на электронных вычислительных машинах.

При проведении анализа необходимо рационально применять комплекс статистических, физических, физико-химических и других методов исследований, в том числе методов технической диагностики.

При планировании комплексных экспериментов следует определить их составные части, т. е. виды испытаний, служащие средством комплексных исследований. Как показал анализ, комплексные эксперименты должны сочетать сравнительные натурные и лабораторные испытания и исследования.

Лабораторные испытания и исследования, в частности климатические испытания, исследование и диагностика отказов, проводимая физико-техническими методами, исследование коррозионных поражений химическими методами и т. д., применяемые в рамках комплексного эксперимента, необходимы для анализа причин и характера отказов и выявления основных факторов, их вызывающих. Однако основной экспериментальной базой комплексных исследований являются натурные испытания.

Натурные испытания обеспечивают получение наиболее полной и достоверной информации о комплексном влиянии факторов окружающей среды на эксплуатационные показатели и механизм отказов электронных приборов при их эксплуатации и хранении в течение длительного времени. Они позволяют выявить особенности воздействия климатических факторов, определить фактические эксплуатационные показатели и предельные возможности электронных приборов, их наиболее изменяющиеся параметры, исследовать характер реальных физико-химических процессов, протекающих в приборах при воздействии естественных факторов окружающей среды и разработать способы их математического описания и моделирования.

В рамках комплексных исследований натурные испытания дают возможность уточнить требования к электронным приборам в части внешних воздействий, исследовать основные конструктивные принципы, новые перспективные материалы и приборы, способы их защиты и получить данные, необходимые для совершенствования существующих методов лабораторных испытаний.

Неоспоримым преимуществом натурных испытаний является то, что их возможно и целесообразно проводить в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации и хранения. При этом правильная постановка эксперимента позволяет исключить такие факторы, как качество обслуживания, ремонта, специфичность хранения и т. д., степень действия которых в большинстве случаев очень трудно точно определить.

Таким образом, натурные испытания являются базой для решения фундаментальных проблем повышения стойкости электронных приборов к внешним воздействиям и, в первую очередь — для разработки научно обоснованных методов, средств и необходимых критериев, позволяющих своевременно, быстро и качественно оценивать, прогнозировать и обеспечивать заданные эксплуатационные характеристики изделий.

Одним из основных принципов организации и планирования экспериментов является принцип сравнительных испытаний. Так, натурные сравнительные испытания следует проводить в различных климатических зонах, а лабораторные — в различных испытательных режимах. При этом необходимо обеспечить сопоставимость результатов сравнительных испытаний, полученных в различных климатических условиях, для чего следует применять идентичные методы и средства измерений и испытаний, испытательное оборудование и приспособления. Тогда сравнительные испытания позволяют определить влияние различных по виду, значению и интенсивности климатических и других дестабилизирующих факторов, воздействующих в сравниваемых условиях испытаний, на процессы изменения параметров и свойств электронных приборов.

Проведение в рамках комплексных исследований лабораторных испытаний совместно с натурными дает возможность с помощью сравнения не только выделить основные дестабилизирующие факторы и процессы, происходящие в изделиях, но и установить степень соответ-

ствия (переводные коэффициенты) между результатами воздействия естественных и искусственных условий на электронные приборы, что необходимо для разработки режимов и методов ускоренной оценки и прогнозирования эксплуатационных показателей.

Опыт показал, что планирование комплексных экспериментов на основе изложенных положений обеспечивает значительное повышение эффективности исследований в целом, так как существенно сокращает объем и стоимость экспериментальных работ, повышая в то же время их информативность.

Как показано на рис. 1, проведение комплексных экспериментов является третьим этапом исследований, в ходе которого с помощью совокупности метрологических операций, физических, физико-химических методов, а также методов неразрушающего контроля и технической диагностики должны быть получены данные, необходимые для выполнения четвертого этапа исследований — обработки и анализа полученной в результате экспериментов и априорной информации.

В рамках четвертого этапа данные, полученные в ходе комплексных экспериментов, целесообразно сопоставить с результатами анализа, проведенного на первом этапе комплексных исследований для повышения достоверности выводов. Обработку и анализ полученной информации следует выполнять комплексно, в соответствии с положениями, изложенными в гл. 5 и 6.

В результате работ, проведенных на четвертом этапе, необходимо получить информацию:

— о фактических эксплуатационных характеристиках электронных приборов;

— о стойкости материалов, конструкций, средств постоянной и временной защиты;

— о наиболее информативных параметрах и критериях оценки стойкости;

— об особенностях воздействия внешних факторов в различных условиях;

— о причинах и видах отказов электронных приборов;

— о степени соответствия результатов лабораторных и натурных испытаний;

— о форме и структуре физико-математических моделей механизма отказов и изменения параметров электронных приборов при воздействии внешних факторов.

Эта информация должна быть использована на пятом этапе, в рамках которого проводятся работы, обеспечивающие выполнение основных целей комплексных исследований. Кроме того, полученную информацию следует использовать при корректировке плана комплексных экспериментов.

Работы по реализации результатов исследований, проводимые на пятом этапе, включают разработку справочных данных об эксплуатационных показателях электронных приборов, способов их защиты и повышения стойкости и сохраняемости, разработку и стандартизацию оптимальных требований к приборам и методы их испытаний. Ими заканчиваются комплексные исследования.

Внедрение результатов комплексных исследований должно осуществляться с помощью внешних управляющих связей через систему управления качеством. Информация о результатах длительных исследований должна быть использована при анализе, проводимом на первом этапе работ для уточнения их целей и плана, а также при организации и планировании новых комплексных исследований.

Таким образом, проведение комплексных исследований в соответствии со структурной моделью, представленной на рис. 1, обеспечивает их оптимальную организацию и планирование, а также получение оперативной информации, необходимой для повышения качества электронных приборов и оптимизации методов их испытаний.

Как было показано выше, одним из основных средств комплексных исследований являются натурные испытания в различных климатических условиях.

Натурные испытания представляют собой сложный и дорогостоящий эксперимент, поэтому необходимо более подробно остановиться на их организации и планировании.

Для обеспечения эффективного проведения работ натурные испытания должны быть представлены как единая система. В соответствии с принципами системного подхода необходимо до начала испытаний сформулировать цели, определить структуру этой системы, ее внешние и внутренние связи, рассматривая ее в качестве части системы комплексных исследований. Основные цели натурных испытаний:

— выявление особенностей воздействия климатических факторов в различных условиях испытаний;

— определение влияния климатических и эксплуатационных факторов на параметры, свойства и механизм отказов электронных приборов;

— выявление параметров приборов, подверженных наибольшим изменениям при воздействии климатических факторов;

— определение фактической долговечности и сохраняемости электронных приборов;

— получение данных для уточнения критериев оценки эксплуатационных свойств приборов и их стойкости к внешним воздействиям;

— проверка способов постоянной и временной защиты электронных приборов, а также способов повышения их стойкости;

— определение причин и видов отказов электронных приборов в натурных условиях;

— разработка физико-математических моделей механизма отказов и изменения параметров электронных приборов при воздействии факторов окружающей среды.

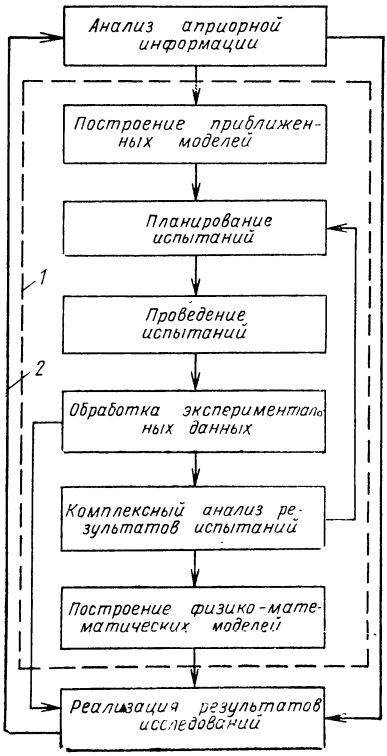


Рис. 2. Структурная модель системы натурных испытаний (*1*) как части комплексных исследований (*2*).

Следует подчеркнуть, что значительные затраты на проведение натурных испытаний оправдают себя только в том случае, если испытания будут проводиться в рамках комплексных исследований, обеспечивающих оперативную реализацию их результатов и будут способствовать комплексному решению всей проблемы в целом. Кроме того, натурные испытания следует планировать так, чтобы осуществить комплексное выпол-

нение перечисленных выше основных целей, и оперативно использовать информацию о результатах других экспериментов, проводимых в рамках комплексных исследований (анализ априорной информации, лабораторные испытания, исследования физико-техническими методами неразрушающего контроля и т. д.). Поэтому важную роль в обеспечении эффективности натурных испытаний играют внешние информационные связи, объединяющие эти испытания со всей системой комплексных исследований.

Выполнение основных целей натурных испытаний и снижение затрат на их проведение может быть обеспечено организацией и планированием испытаний в соответствии со структурной моделью, представленной на рис. 2, которая предусматривает последовательное, поэтапное планирование экспериментов и их выполнение по следующему алгоритму:

1-й этап — построение приближенных моделей;

2-й этап — планирование испытаний;

3-й этап — проведение испытаний;

4-й этап — обработка экспериментальных данных;

5-й этап — комплексный анализ результатов испытаний;

6-й этап — построение физико-математических моделей.

Внешние связи модели системы натурных испытаний, представленной на рис. 2, объединяют ее с другими частями системы комплексных исследований, а внутренние связи обеспечивают циклическую циркуляцию потоков необходимой информации между отдельными этапами.

Специфика натурных испытаний, заключающаяся в их большой продолжительности, делает особенно важной рациональную организацию работ и их планирование. Наиболее эффективным является цикличное проведение всего комплекса работ, предусмотренных моделью, т. е. после каждого периодического измерения параметров и исследования свойств электронных приборов при натурных испытаниях производится обработка экспериментальных данных, комплексный анализ результатов испытаний, построение моделей и уточнение плана эксперимента.

Описанная стратегия дает возможность своевременно принимать решение о направлении дальнейших работ, а также о проведении дополнительных испытаний и привлечении новых методов исследований и анализа.

Известно, что основой для разработки методов ускоренной оценки и прогнозирования эксплуатационных показателей электронных приборов являются физико-математические модели, описывающие функциональную связь между изменениями свойств приборов и внешними факторами, воздействующими на них в реальных условиях [1, 10, 14]. Поэтому одной из главных задач организации и планирования натурных испытаний является разработка физико-математических моделей.

Этой цели служит системный подход, предусматривающий прежде всего рассмотрение внешних факторов, реакции приборов на их воздействие, а также механизма внутренних физико-химических процессов как единой системы, ее изучение с помощью измерений метеорологических, электрических, физико-химических и других величин и применение для анализа комплекса различных методов, в том числе статистических и физико-технических.

Кроме того, системный подход обеспечивает эффективное планирование и проведение каждого этапа натурных испытаний, предусмотренных структурной моделью. Это обстоятельство особенно важно, так как каждый этап является по существу системой, в которой выполняется большой комплекс работ.

Вопросам эффективного планирования отдельных этапов натурных испытаний, т. е. выбору условий методов и средств проведения испытаний, процедур обработки и анализа полученной информации, а также методам построения физико-математических моделей посвящены следующие главы книги.

2. Анализ данных о механизме воздействия факторов окружающей среды на свойства электронных приборов

2.1. Системный подход к проведению анализа

В гл. 1 было показано, что необходимым условием эффективного планирования комплексных экспериментов, в частности натурных испытаний, является предварительный анализ имеющейся информации, в результате

которого должны быть получены предварительные данные об особенностях воздействия факторов, оказывающих наибольшее влияние на параметры и свойства электронных приборов, а также данные об основных физико-химических процессах, приводящих к отказам.

Предварительный анализ априорной информации о влиянии климатических факторов на свойства электронных приборов для конкретных их типов может базироваться на некоторых общих закономерностях и положениях, основные из которых изложены ниже.

Электронные приборы при проведении исследований воздействия факторов окружающей среды можно представить как физическую систему, состоящую из проводниковых, полупроводниковых или изоляционных материалов, а также конструкционных и контактных составных частей. Эта система характеризуется некоторым техническим параметром или набором параметров, изменение которых сверх предельно допустимых значений вызывает отказ. Как правило, отказы электронных приборов обусловлены определенными физическими или физико-химическими процессами. Характер и кинетика этих процессов зависят как от внутренних свойств приборов (качества материалов, покрытий, конструкций и технологии), так и от внешних условий (факторов окружающей среды, режимов работы и применения).

Таким образом, зависимость эксплуатационных характеристик электронных приборов от факторов окружающей среды включает в себя зависимость этих характеристик от физических свойств материалов и физико-химических процессов изменения свойств.

Ввиду сложности процессов взаимодействия приборов с окружающей средой необходимо рассмотреть основные особенности действия факторов окружающей среды в естественных условиях, механизм и характер процессов, протекающих в приборах, и некоторые результаты внешних воздействий с позиций системного подхода к физике отказов [1, 16].

Сущность такого подхода в данном случае заключается в том, что весь процесс взаимодействия изделия с окружающей средой рассматривается как единая система, в основе которой лежат физико-химические процессы деградации свойств материалов и конструкций изделия. При этом факторы окружающей среды и особенности их действия исследуются на основе анализа ха-

рактера именно тех процессов, которые они вызывают в материалах и изделиях. В то же время рассматриваются причины изменения эксплуатационных характеристик и появления отказов электронных приборов, т. е. механизм процессов ухудшения их внутренних свойств.

Таким образом, анализ влияния факторов окружающей среды на электронные приборы целесообразно проводить по следующей схеме, указанной на рис. 3.

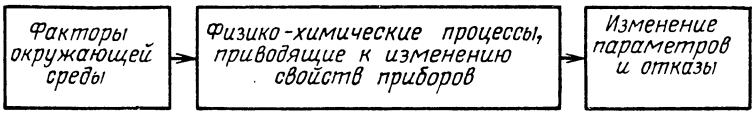


Рис. 3. Логическая схема анализа влияния факторов окружающей среды на электронные приборы.

2.2. Особенности воздействия климатических факторов в естественных условиях на электронные приборы

Воздействие климатических факторов окружающей среды на электронные приборы при их эксплуатации, транспортировании и хранении приводит к значительному количеству отказов. Климатические факторы и их влияние на эксплуатационные характеристики различны в различных географических районах и зонах земного шара. В любом географическом районе действует большое количество климатических факторов и их сочетаний, например: повышенная или пониженная температура, высокая или низкая относительная влажность воздуха, пониженное или повышенное атмосферное давление, изменения температуры, солнечная и проникающая радиация, осадки, загрязнение атмосферы, песок, пыль ветер, ионизация атмосферы и т. д. Естественно, это затрудняет анализ воздействия климата на электронные приборы. Однако результаты проведенных в последние десятилетия исследований [3, 6, 17] показали, что существенные ухудшения эксплуатационных характеристик изделий и материалов обычно обусловлены воздействием ограниченного числа факторов, называемых основными. Эти основные климатические факторы могут воздействовать прямо или косвенно.

К прямому воздействию климатических факторов относятся, например, воздействия температуры воздуха, атмосферного давления и влажности, а к косвенным — более сложные явления, которые вызывают атмосферную коррозию, поражение грибковой плесенью и т. д. Кроме того, воздействие некоторых факторов, являющихся основными для изделий и материалов, вообще может быть сглажено или даже исключено соответствующими условиями эксплуатации и хранения электронных приборов. Так, прямое воздействие солнечной радиации, ветров, осадков и других факторов в условиях применения электронных приборов (в составе аппаратуры при эксплуатации, в упаковке при транспортировании и хранении) превращается в косвенное воздействие. Следовательно, такие факторы, как солнечная радиация, ветер, осадки, динамическое действие песка и пыли можно не рассматривать в качестве основных при анализе воздействия климатических факторов на электронные приборы. Исследования стойкости электронных приборов, а также материалов и покрытий, применяемых при их изготовлении, в различных климатических зонах и условиях эксплуатации полностью подтвердили эти положения [6].

Можно считать установленным, что для электронных приборов основными факторами, вызывающими наиболее существенные ухудшения их эксплуатационных характеристик и свойств, являются:

— повышенная или пониженная температура воздуха и ее изменение;

— повышенная относительная влажность воздуха;

— атмосферное давление;

— коррозионно-или биологически-агрессивная атмосфера.

Однако выделение из множества факторов окружающей среды основных, к сожалению, еще не решает проблемы в целом, так как в естественных условиях воздействие климатических факторов обладает рядом специфических особенностей, на которых следует остановиться особо.

Анализ показал, что ухудшения эксплуатационных характеристик электронных приборов, вызванные одним или несколькими основными климатическими факторами, являются существенными, если рассматриваемые факторы достигают по своей интенсивности или длительности некоторых критических значений. Поэтому в различных

климатических зонах наборы комбинаций основных климатических факторов могут изменяться. Например, длительное воздействие постоянной высокой относительной влажности в сочетании с высокой температурой, характерное для зоны влажных тропиков, приводит к проникновению влаги в объем диэлектрика и ухудшению характеристик материалов и изделия. Для этой зоны указанный климатический фактор и время его действия выше критического значения является основным. В то же время в зоне умеренного климата периоды, характеризующиеся сочетанием высокой температуры и постоянно высокой влажности, непродолжительны и не достигают критического значения. Большую часть времени занимают периоды с часто высокими, но изменяющимися значениями относительной влажности в сочетании со сравнительно невысокими температурами, что вызывает, как правило, поверхностные процессы в тех же изделиях. Поэтому для умеренной зоны основным фактором является повторяемость, интенсивность и длительность сочетаний повышенной влажности и температуры, а не длительность экстремальных значений этих сочетаний [17].

В любой географической зоне или районе всегда действует не менее трех перечисленных основных климатических факторов: температура, атмосферное давление и влажность воздуха. Они воздействуют непосредственно на электронные приборы и создают условия для агрессивного воздействия остальных факторов. Так, факторами, создающими коррозионно-агрессивную атмосферу, являются повышенная относительная влажность воздуха в сочетании с повышенной температурой и загрязнением воздуха коррозионно-агрессивными агентами (сернистым газом, хлоридами, аммиаком, окислами азота и др.).

Факторами, создающими биологически-агрессивную атмосферу, являются сочетание температуры в пределах 22—30°С с повышенной, сравнительно постоянной относительной влажностью около 90% и загрязнением воздуха спорами грибков. Воздействие на электронные приборы оседающей пыли также значительно интенсифицируется в условиях повышенной влажности и повышенной температуры, приводящих к образованию пленки влаги на поверхностях.

Следует отметить, что факторы, являющиеся основными для материалов или изделий одного типа, могут

не быть таковыми для материалов и изделий другого типа [17]. Так, повышенная относительная влажность, вызывая существенное ухудшение свойств и характеристик большого количества классов изделий (радиодеталей, радиокомпонентов и др.), не оказывает заметного влияния на параметры ферритовых и большинства герметичных полупроводниковых изделий, для которых основными факторами является температура и ее изменение. Кроме того, воздействие одного из основных факторов в различных сочетаниях может вызывать ухудшение различных параметров и свойств одного и того же изделия. Например, воздействие повышенной влажности приводит к снижению сопротивления изоляции, увеличению емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов. Это существенно усложняет анализ результатов воздействия климатических факторов на параметры электронных приборов.

В естественных условиях значения климатических факторов постоянно меняются, и эти изменения отличаются по частоте и амплитуде. Так, например, относительная влажность существенно изменяется за сутки и в то же время это изменение незначительно в течение года. Ввиду того что процессы ухудшения параметров и свойств электронных приборов, возникающие вследствие изменяющегося воздействия климатических факторов, существенно отличаются от процессов, вызванных постоянным их воздействием, необходимо при проведении исследований учитывать характер изменения основных климатических факторов.

Воздействие климатических факторов на электронные приборы может быть прерывистым, если в отдельные периоды их интенсивность снижается ниже критического значения, вызывающего процессы деградации в изделиях. Это может ускорять или замедлять течение процессов ухудшения характеристик материалов и изделий. Например, сопротивление изоляции при прерывистом воздействии повышенной влажности воздуха может частично восстанавливаться в сухие периоды. С другой стороны, воздействие высокой влажности во влажный период может привести к проникновению воды в толщу диэлектрика и его набуханию, а десорбция в сухой период — к образованию трещин, что во время следующего влажного периода ускорит проникновение влаги и ухудшение свойств материала и изделия в целом [17]. По-

этому необходимо учитывать повторяемость и продолжительность действия основных климатических факторов при анализе механизма воздействия климата на электронные приборы.

В естественных условиях климатические факторы могут воздействовать на электронные приборы одновременно или последовательно. Изменения в изделиях под воздействием одного фактора могут влиять на процессы изменения характеристик при последующем воздействии другого климатического фактора. В то же время одновременное воздействие нескольких климатических факторов может привести к более сильным изменениям, чем сумма неодновременных воздействий тех же факторов.

Таким образом, сложность анализа влияния климатических факторов на электронные приборы усугубляется необходимостью учета последовательности действия основных факторов. Необходимо также учитывать, что в процессе эксплуатации электронных приборов изменение их свойств и характеристик может происходить не только из-за воздействия основных климатических факторов, но и вследствие действия различных эксплуатационных факторов, в частности электрической нагрузки. Эксплуатационные факторы, действующие в сочетании с климатическими, могут либо замедлить, либо ускорить процесс ухудшения характеристик. Так, нагрев поверхности изделий и испарение пленки влаги вследствие периодического включения электрической нагрузки может вызвать улучшение параметров электронных приборов, зависящих от поверхностных процессов, увлажнения. С другой стороны, электрическая нагрузка может вызвать развитие электролитических процессов, интенсивно протекающих при воздействии повышенной влажности и вызывающих, например, миграцию серебра в резисторах или пробой диэлектрика в конденсаторах.

Установлено, что для некоторых классов электронных приборов (например, радиодеталей, радиокомпонентов, полупроводниковых приборов) чередующееся или одновременное воздействие основных климатических и эксплуатационных факторов (особенно периодических электрических нагрузок) приводит к значительно большему количеству отказов, чем отдельное действие каждой группы этих факторов. С другой стороны, в изделиях, подвергающихся длительному хранению перед эксплуатацией, постепенное изменение характеристики свойств

под воздействием климатических факторов может иметь решающее значение по сравнению с изменением характеристик под воздействием эксплуатационных факторов (нагрузок).

Следовательно, при проведении исследований влияния климатических факторов на электронные приборы необходимо рассматривать действие этих факторов в сочетании с нагрузками, т. е. рассматривать весь комплекс дестабилизирующих факторов, воздействующих на электронные приборы в естественных условиях окружающей среды.

2.3. Характер отказов и процессов изменения свойств электронных приборов в естественных условиях

Как указано выше, превышение дестабилизирующими факторами критических значений (по длительности или интенсивности) вызывает в электронных приборах интенсивное протекание сложных физико-химических процессов, приводящих к изменению внутренних свойств и возникновению отказов. При рассмотрении механизма процессов, приводящих к отказам, важным является тот факт, что значительная часть отказов электронных приборов обусловлена скрытыми дефектами производства, носит случайный характер и непосредственно со свойствами приборов не связана. Дефекты производства могут более интенсивно проявляться в виде отказов при воздействии климатических факторов, а также могут ускорить возникновение отказов, вызванных физико-химическими процессами в материалах. Однако они не обусловлены физическими причинами и не являются неотъемлемыми свойствами материалов или конструкции приборов. Поэтому целесообразно классифицировать отказы, возникающие в электронных приборах при их эксплуатации и хранении, по условиям возникновения на конструкционные и технологические (дефектовые) и эксплуатационные (ресурсные) отказы.

Исследования [16] показали, что отказы первой группы превалируют в полупроводниковых приборах, интегральных микросхемах и во многих типах электровакуумных приборов (ЭВП). Эксплуатационные отказы закономерны, они обусловлены конструкцией, применяемыми материалами и условиями эксплуатации. Такие от-

казы типичны для радиодеталей, радиокомпонентов, ферритовых изделий и частично для электронных ламп. К ним относятся также отказы электронных приборов, вызываемые коррозией.

Классификация отказов по условиям возникновения чрезвычайно важна, так как она дает возможность поразному подходить к исследованию и устранению причин различных отказов и повышению качества электронных приборов.

Дефектовые отказы должны быть обнаружены и устранены до ввода в эксплуатацию изделий на стадии проектирования и производства путем повышения технологической культуры и улучшения контроля качества. Эксплуатационные отказы должны быть обнаружены при испытаниях, моделирующих основные процессы в приборах. Предупреждение, выявление и устранение этих отказов требует при разработке электронных приборов и методов их испытаний знания физико-химических процессов в изделиях, а также изучения зависимостей этих процессов и параметров изделий от воздействующих факторов.

Таким образом, классификация отказов по условиям возникновения необходима для правильного анализа результатов эксплуатации и испытаний. Она позволяет сделать своевременные выводы о необходимости конструктивных и технологических мероприятий для повышения качества изделий или о необходимости проведения исследований с целью совершенствования методов испытаний электронных приборов [10].

Переходя к рассмотрению физико-химических процессов изменения свойств электронных приборов, вызванных воздействием климатических факторов, необходимо прежде всего оценить их продолжительность. Некоторые процессы длятся несколько минут, другие несколько суток, а отдельные процессы продолжаются месяцы и годы. В естественных условиях большинство процессов заканчиваются через определенное время, за которое устанавливается динамическое равновесие или полное насыщение. Так, процесс ухудшения поверхностных электрических характеристик электронных приборов, вызванный адсорбцией влаги, прекращается через несколько секунд, в течение которых достигается равновесие образовавшейся пленки влаги с окружающей влажной средой [3, 4].

С другой стороны, процессы старения материалов в электронных приборах, приводящие к структурным изменениям, и обусловленное ими ухудшение объемных электрических характеристик материалов происходят в течение многих месяцев или лет, как и процессы диффузии влаги в непористые материалы, которые прекращаются при достижении динамического равновесия. Как правило, длительные процессы вызывают постепенные отказы, а кратковременные могут приводить к внезапным отказам, обусловленным экстремальными значениями климатических факторов.

Классификация процессов, вызванных климатическими факторами, по продолжительности на длительные и кратковременные целесообразна для оценки возможности имитации этих процессов в лабораторных условиях без существенного их ускорения. Как правило, кратковременные процессы вызываются изменяющимися условиями погоды, в то время как длительные могут быть вызваны продолжительным воздействием климатических факторов. Очевидно, что кратковременные процессы в несколько суток легко имитировать в лабораторных условиях, а для имитации более длительных процессов необходимы ускоренные испытания, форсирующие эти процессы.

При оценке стойкости и качества изделий необходимо учитывать, что климатические факторы в естественных условиях вызывают в электронных приборах как обратимые, так и необратимые процессы. Необратимые процессы, вызывающие необратимые изменения характеристик и полные отказы приборов, могут протекать, несмотря на то, что значения основных климатических факторов, вызывающих эти процессы, стали ниже критического уровня или эти факторы уже не действуют вообще [17].

Обратимые процессы и связанные с ними изменения характеристик приборов прекращаются, если значения основных климатических факторов становятся ниже критического уровня, например, в результате сезонных и погодных изменений.

Типичными примерами необратимых процессов являются процессы коррозии и старения, обратимых — процессы адсорбции влаги на поверхности, периодической абсорбции и десорбции влаги в материалах приборов. Необратимые процессы могут вызывать устойчивые па-

раметрические и полные отказы электронных приборов, в то время как обратимые процессы предопределяют наличие перемежающихся параметрических отказов, которые легко устранить.

Таким образом, для исследования влияния климатических факторов на эксплуатационные характеристики электронных приборов необходима классификация процессов по их продолжительности и виду изменений, вызываемых ими в изделиях:

— длительные обратимые процессы (процессы периодической сорбции и десорбции влаги, приводящие к изменению объемного сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь, емкости, сопротивления изоляции; осаждение пыли на поверхности, приводящее к ухудшению поверхностного сопротивления и др.);

— длительные необратимые процессы (коррозия выводов, приводящая к их обрыву; коррозия контактов, приводящая к увеличению переходного сопротивления; старение под действием температуры и влажности, вызывающее структурные изменения в изоляционных материалах изделий и др.);

— кратковременные обратимые процессы (например, образование пленки влаги на поверхности и поверхностное увлажнение, приводящие к изменению поверхностного сопротивления изоляции);

— кратковременные необратимые процессы (например, перегрев, приводящий к полному отказу).

Характер и механизм физико-химических процессов, предшествующих отказам или нарушению работоспособности электронных приборов, черезвычайно разнообразны. По существу, любой процесс изменения свойств прибора является сложным комплексом, состоящим из нескольких различных процессов, которые могут протекать в различных материалах и частях конструкции электронного прибора. Положение осложняется тем, что в естественных условиях воздействует несколько дестабилизирующих факторов. Этим объясняется то, что до настоящего времени для большинства электронных приборов не установлены механизмы процессов, приводящих к отказам при климатических воздействиях в естественных условиях эксплуатации и хранения.

Однако, несмотря на сложность механизма этих процессов, их изучение необходимо для разработки научных методов исследований влияния климатических

факторов на электронные приборы, изыскания научно обоснованных методов лабораторных испытаний, а также разработки методов прогнозирования и повышения стойкости приборов.

Исходя из этих задач, а также учитывая основные особенности воздействия климатических факторов на электронные приборы, изложенные выше, можно наметить главные направления в решении проблемы.

При исследованиях влияния климатических факторов на характеристики электронных приборов необходимо рассматривать только основные климатические факторы, учитывая при этом изменчивость, повторяемость, продолжительность, интенсивность, порядок и последовательность их воздействия и взаимодействие с эксплуатационными факторами.

Кроме того, при проведении предварительного анализа каждый процесс в электронных приборах, обусловленный внешними воздействиями, надо рассматривать отдельно, но в непосредственной связи с основным климатическим фактором, его вызывающим. При этом необходимо установить для каждого процесса критические значения климатических факторов, вызывающие интенсивное его протекание и соответственно существенное изменение характеристик и свойств электронного прибора в целом.

После изучения механизма и результатов воздействия единичных климатических факторов на параметры и свойства приборов создаются условия для исследования влияния сложного комплекса климатических и эксплуатационных факторов на электронные приборы в естественных условиях окружающей среды. При анализе результатов и механизма воздействия единичных климатических факторов решающим условием является целенаправленное использование накопленной к настоящему времени информации по результатам лабораторных климатических испытаний электронных приборов. Правильное использование этой информации дает возможность в некоторых случаях связать основные климатические факторы и вызываемые ими основные физико-химические процессы с типичными отказами или ухудшениями характеристик электронных приборов. Это создает предпосылки для разработки обобщенной предварительной модели воздействия климатических факторов на электронные приборы.

2.4. Обобщенная модель воздействия климатических факторов на параметры и свойства электронных приборов

Анализ отечественных и зарубежных данных о влиянии климатических факторов на процессы, протекающие в электронных приборах и приводящие к изменению их свойств и параметров, позволяет представить модель взаимодействия электронных приборов с факторами окружающей среды в следующем обобщенном виде.

В результате воздействия климатических факторов за счет движения воздуха, электростатического притяжения, осаждения пыли, агрессивных примесей или образования пленки влаги на поверхности приборов возникают так называемые поверхностные эффекты, которые являются причинами многих отказов. К указанным эффектам относятся недопустимое повышение или понижение температуры поверхности, разрушение защитного слоя покрытий, коррозия металлических поверхностей, контактов и выводов, перекрытие, электрический пробой и др.

Поверхностные эффекты протекают вследствие нескольких физических и химических процессов, основными из которых являются физические (адсорбция, теплоотдача и др.), химические или электролитические (коррозия, окисление, эррозия) процессы. Под действием факторов окружающей среды с течением времени наряду с физико-химическими процессами, происходящими на поверхности (или в некоторых случаях вследствие их возникновения), в объеме конструкций и материалов начинают протекать внутренние процессы, вызывающие изменение состояния материалов (изменение температуры, концентрации влаги и т. д.), что приводит к изменению свойств этих материалов (теплопроводности, электропроводности, диэлектрической проницаемости и др.) [1].

Изменение свойств приводит к изменению параметров и отказам электронных приборов. Так, например, адсорбированная на поверхности влага, проникая в диэлектрик, увеличивает содержание воды в его толще и соответственно изменяет его свойства (уменьшает сопротивление утечки, электрическую прочность, увеличи-

вает электропроводность и т. д.), что вызывает снижение сопротивления изоляции, пробой, увеличение тангенса угла диэлектрических потерь и емкости [3, 4].

К внутренним процессам, во многих случаях оказывающим решающее влияние на работоспособность электронных приборов и возникновение отказов за счет изменения внутренних свойств материалов, относятся процессы диффузии (переноса), адсорбции и десорбции, релаксации, рекристаллизации, электрохимической коррозии, электролиза, деформации и др. Изменение внутренних свойств материалов (вследствие структурных изменений, набухания, усадки или пластической деформации и т. д.) может, в свою очередь, повлиять на состояние поверхности (например, растрескивание эмали в покрытиях конденсаторов из-за набухания диэлектрика).

В связи со все возрастающими требованиями к долговечности и сохраняемости, предъявляемыми в последние десять лет к электронным приборам, особо важную роль приобрело изучение процессов изменения внутренних физико-химических свойств во времени, т. е. процессов старения. Практически все материалы подвержены законам естественного старения. Естественное изменение свойств во времени может ускоряться воздействием климатических факторов, однако даже при защите от воздействия факторов окружающей среды в материалах электронных приборов в процессе длительной эксплуатации или хранения могут происходить структурные превращения или процессы релаксации [10]. Так, при старении металлов и сплавов могут протекать процессы превращения кристаллической структуры в твердом состоянии (например, процессы распада твердых растворов, мартенситные превращения, аллотропические превращения и др.), т. е. самопроизвольный переход из метастабильного в более стабильное равновесное состояние структуры материала [10].

При старении полимерных материалов происходят процессы деструкции полимеров под влиянием тепла, света или кислорода, т. е. термическая, фотохимическая и окислительная деструкции, подчиняющиеся законам кинетики химических реакций разложения. Кроме того, в полимерных изоляционных материалах изделий при воздействии в течение длительного времени электрического напряжения могут протекать процессы так назы-

ваемого электрического старения, снижающие электрическую прочность диэлектриков.

При старении полупроводниковых материалов возникают процессы рекомбинации, переноса частиц, релаксации, изменения поверхностного состояния кристаллов, диффузии компонентов, которые приводят к деградации и дрейфу основных параметров и характеристик полупроводниковых приборов.

При старении стеклянных оболочек ЭВП происходит необратимое снижение прочности стекла и возникают внутренние напряжения, а иногда и структурные изменения, вызывающие растрескивание оболочек, нарушение герметичности приборов и их отказы. Кроме того, стекло некоторых марок подвержено выщелачиванию с течением времени, стекла других марок могут иметь пористую поверхность, через которую с течением времени внутрь оболочек натекают легкие атмосферные газы, что приводит к отказам.

Таким образом, наряду с климатическими факторами окружающей среды и электрическими нагрузками время эксплуатации или хранения электронных приборов является основным дестабилизирующим фактором, оказывающим существенное влияние на качество и надежность.

Следует отметить, что сложные процессы старения материалов и электронных приборов изучены значительно меньше, чем процессы, вызванные воздействием других дестабилизирующих факторов. Это объясняется тем, что исследования долговечности и сохраняемости изделий стали широко проводиться только в последнее время, а материалы и конструкция электронных приборов таковы, что для изучения процессов их старения необходимо длительное время.

Резюмируя изложенное выше, можно утверждать, что процессы естественного старения, эксплуатационные нагрузки, а также воздействие факторов окружающей среды с течением времени вызывают сложные, взаимосвязанные и взаимообусловленные процессы в электронных приборах, причем в зависимости от типа прибора виды и механизм отказов могут быть различными. Поэтому процессы, вызывающие нарушение работоспособности изделий, должны быть проанализированы в каждом конкретном случае для данного типа прибора и условий эксплуатации. Однако анализ конкретных про-

цессов, протекающих в изделиях, должен базироваться на общих закономерностях, характеризующих эти процессы, которые могут являться основой для построения некоторых общих физических моделей отказов и процессов их возникновения. В общем случае такая модель может быть представлена в виде выражения

$$X = f(a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n, y_1, y_2, y_3, \ldots, y_m, t),$$

где X — некоторый нормированный параметр или свойство электронного прибора; $a_1, a_2, \ldots, a_n$ — внутренние его свойства, обусловленные конструкцией и применяемыми материалами; $y_1, y_2, \ldots, y_m$ — факторы окружающей среды (климатические факторы, эксплуатационные нагрузки и т. д.); t — время хранения или эксплуатации.

3. Выбор условий проведения испытаний и необходимого оборудования

3.1. Общие положения

Условия проведения натурных испытаний должны максимально приближаться по воздействию климатических факторов внешней среды к реальным условиям эксплуатации и хранения электронных приборов. Поэтому выбор условий испытаний должен базироваться на анализе требований к электронным приборам по категориям исполнения и эксплуатационным характеристикам, условий и режимов их эксплуатации в аппаратуре, условий и методов хранения, средств консервации и упаковки, а также климатических характеристик различных районов и зон, в которых возможно применение электронных приборов.

Таким образом, условия проведения натурных испытаний — это совокупность климатических и эксплуатационных факторов, влияющих на изменения параметров, потерю товарного вида и возникновение отказов электронных приборов. Они определяются в зависимости от:

— климатической зоны, района и географического пункта, в котором проводятся испытания;

— места размещения или хранения изделий при испытаниях (открытая площадка, навес, неотапливаемое помещение);

— степени защищенности изделий средствами защиты (упаковка, консервация);

— режима применения (эксплуатация или хранение).

При проведении натурных испытаний должны воспроизводиться типичные климатические условия, встречающиеся при использовании электронных приборов в различных зонах и районах земли (макроклимат), а также в различной аппаратуре или упаковке (микроклимат). Поэтому для обоснованного выбора условий проведения натурных испытаний необходима техническая классификация климатических условий, а также условий эксплуатации и хранения, технически и экономически целесообразно отражающая реальные условия применения электронных приборов.

Кроме того, при проведении натурных испытаний важную роль играет правильный выбор оборудования, оснащения и других средств, способствующих выполнению основных целей исследований. Поэтому, учитывая специфику методики проведения натурных испытаний электронных приборов и классификацию условий эксплуатации и хранения, необходимо определить общие требования к климатическим испытательным станциям, предназначенным для исследования воздействия климатических факторов на электронные приборы.

3.2. Климатическое районирование территории СССР применительно к испытаниям электронных приборов

Многообразные климатические условия различных районов оказывают существенное влияние на изделия. Для правильного выбора материалов и конструкций при разработке изделий, способов их консервации и упаковки, определения требований, норм и методов испытаний изделий на стойкость к климатическим факторам, а также для определения и оценки условий эксплуатации и хранения технических изделий необходима классификация климатических воздействий.

В настоящее время действует стандарт [18], устанавливающий классификацию климатов, климатическое районирование территории СССР и статистические параметры климатических факторов применительно к промышленным изделиям и материалам. Стандарт уточняет глобальное климатическое районирование для технических целей, принятое СЭВ, применительно к особенностям климата СССР

Таблица 3.1

Климатическое районирование территории СССР для проведения испытаний изделий электронной техники и основные характеристики представительных пунктов

Климатические зоны	Климатический район	Представительные пункты	Температура воздуха, °С										Относительная влажность, %				Типы атмосферы*
			январь			июль			Абсолютный максимум	Абсолютный минимум	Максимальная среднесуточная амплитуда	Среднее число дней в году с переходом температуры через 0°	январь		июль		
			Среднемесячная	Среднемаксимальная	Среднеминимальная	Среднемесячная	Среднемаксимальная	Среднеминимальная					Максимум	Минимум	Максимум	Минимум	
Холодная	Очень холодный, избыточно влажный	Тикси	—33,3	—30,1	—36,8	7,0	11,8	3,6	33	—54	—	—	78	78	90	80	I, III
	Холодный, влажный	Томск	—19,2	—14,8	—23,4	18,1	23,7	12,6	36	—55	11,9	62,5	82	76	79	58	II
Умеренная	Умеренно холодный, влажный	Ленинград	—7,5	5,0	—10,6	17,7	22,1	13,9	33	—36	9,3	66,8	87	85	75	58	II
	Умеренно холодный, избыточно влажный	Мурманск	—10,2	—6,4	—14,5	11,4	15,2	7,1	33	—39	—	—	85	85	89	68	I, III
	Умеренно теплый, недостаточно влажный	Одесса	—2,5	0,2	—5,[illegible]	22,2	26,9	17,7	37	—28	8,8	46,2	88	81	72	55	II, III
	Умеренно теплый, влажный (среднеземноморский)	Анапа	1,3	4,9	—1,6	22,9	26,9	18,0	36	—26	9,0	45,9	83	76	80	61	I, III
	Умеренный, влажный (муссонный)	Владивосток	—13,8	—12,0	—17,9	18,5	19,5	15,2	36	—31	—	—	68	58	95	85	II, III
Теплая влажная	Субтропический	Батуми	7,1	11,2	3,7	22,8	26,8	19,7	41	—9	8,2	11,8	79	70	85	73	I, III
Жаркая	Жаркий сухой	Ташкент	—0,9	4,3	—4,7	26,9	35,3	18,3	44	—30	17,4	65,3	77	62	51	24	II
	Очень жаркий сухой	Термез	2,1	8,5	—1,9	33,7	39,8	20,9	50	—25	19,8	—	83	60	40	18	I

* По ГОСТ 15150—60.

и разделяет его территорию на климатические зоны и районы, в которых климатические условия статистически однородны.

В основу климатического районирования положены значения среднемесячной температуры в наиболее холодный (январь) и наиболее теплый (июль) месяцы года с учетом относительной влажности воздуха в 13 часов в июле.

Для проведения натурных испытаний изделий в стандарте для каждого из районов определены представительный географический пункт и пункт с экстремальными параметрами. Данные представительного пункта характеризуют средние для района статистические параметры климатических факторов, пункта с экстремальными параметрами — экстремальные параметры климатических факторов.

Однако критерии районирования, применяемые в указанном стандарте, недостаточно полно учитывают специфику воздействия климатических факторов на электронные приборы при их эксплуатации и хранении. Как было показано в гл. 2, основными климатическими факторами, вызывающими существенные изменения параметров и свойств электронных приборов, являются температура воздуха и ее изменение (колебания), повышенная влажность и коррозионно-агрессивная атмосфера. Особенно существенно воздействие повышенной влажности в сочетании с повышенной температурой воздуха. Следовательно, критериями климатического районирования должны быть комплексные характеристики, включающие перечисленные выше факторы. На основании анализа механизма процессов, протекающих в электронных приборах под воздействием климатических факторов, было проведено климатическое районирование территории СССР для натурных испытаний изделий электронной техники, уточняющее районирование, установленное стандартом [19].

Основой районирования является комплексный критерий: сочетание среднемесячной температуры в самый холодный (январь) и самый теплый (июль) месяцы года с максимальной или минимальной относительной влажностью в наиболее сухой и наиболее влажный месяцы года (температурно-влажностный комплекс). Кроме того, при районировании учитывались: среднее число дней в году с переходом через 0°, экстремальные значения температуры и концентрация коррозионно-агрессивных агентов.

В результате осуществлено районирование территории СССР в пределах климатических зон, установленных стандартом, при котором, рассмотрев влияние основных климатических факторов на процессы увлажнения изделий, удалось выделить новые климатические районы и представительные пункты для проведения натурных испытаний (табл. 3.1).

Ввиду того, что климатическое районирование базировалось на анализе процессов с учетом механизма их взаимодействия с климатическими факторами, оно может быть использовано при прогнозировании климатической стойкости и сохраняемости электронных приборов на основе метеорологических характеристик климатических зон.

3.3. Определение условий и режимов испытаний

Чтобы максимально приблизить натурные испытания к реальным условиям эксплуатации и хранения электронных приборов при выборе условий испытаний, следует провести анализ возможных режимов их применения с точки зрения воздействия климатических

факторов. Электронные приборы могут эксплуатироваться и храниться в составе аппаратуры различного назначения и ЗИП, а также в заводской упаковке на складах в различных климатических зонах и местах хранения.

Наиболее распространенными являются следующие виды эксплуатации наземной аппаратуры в зависимости от климатических воздействий: стационарная, ограниченная и повсеместная. Эксплуатация считается стационарной, если аппаратура постоянно используется и хранится на небольшой по размерам территории. Ограниченной считается эксплуатация, если аппаратура используется и хранится в пределах одного климатического района или зоны. Эксплуатация считается повсеместной или неограниченной, если аппаратура предназначена для применения и хранения по всей территории СССР или земного шара.

Натурные испытания электронных приборов, предназначенных для эксплуатации и хранения в составе стационарной аппаратуры и ЗИП, рекомендуется проводить в пунктах, близких по климатическим характеристикам к предполагаемым местам эксплуатации. Испытания электронных приборов для аппаратуры с ограниченной эксплуатацией должны проводиться в представительных пунктах, характеризующих климатическое воздействие отдельных районов и зон или (в особо ответственных случаях) в соответствующих экстремальных пунктах.

Испытания электронных приборов, предназначенных для аппаратуры с повсеместной эксплуатацией, следует проводить параллельно во всех представительных пунктах климатических зон, характеризующих свойственный территории СССР комплекс климатических воздействий.

Натурные испытания электронных приборов в режиме хранения в заводской упаковке также следует проводить параллельно во всех климатических зонах, так как эти изделия после хранения могут применяться повсеместно. Однако если на основании предварительного анализа установлено, что климатические факторы, характеризующие какую-либо зону или район, несущественно влияют на параметры и свойства конкретных типов электронных приборов, то они в этой зоне или районе могут не испытываться.

Степень воздействия климатических факторов на электронные приборы существенно изменяется в зависимости от места их размещения или хранения: на открытой площадке, под навесом, в помещении, в кожухе аппаратуры, в упаковке и т. д. Поэтому места размещения и хранения изделий при натурных испытаниях должны выбираться и оборудоваться в соответствии с требованиями, предъявляемыми действующей нормативно-технической документацией (НТД).

Для проведения исследований в соответствии с действующей климатической классификацией при натурных испытаниях в каждой климатической зоне следует размещать изделия одновременно на открытой площадке, под навесом и в неотапливаемом помещении. Для исследования микроклимата в аппаратуре и ЗИП в указанных трех местах размещения электронные приборы могут испытываться в составе аппаратуры, ее блоков и сборочных единиц, а также в специальных контейнерах, имитирующих кожухи аппаратуры, и кассетах, имитирующих ее блоки [19].

При выборе условий испытаний изделий для определения влияния климатических факторов на срок сохранности при длительном

хранении необходимо рассмотреть возможные способы хранения: в заводской упаковке, с консервацией, в составе аппаратуры или ЗИП; аппаратура или ЗИП, в свою очередь, могут храниться в упаковке или с консервацией.

Каждый из перечисленных способов по-разному защищает электронные приборы от климатических факторов, и это должно учитываться при планировании натурных испытаний.

Реальные условия эксплуатации аппаратуры и входящих в нее электронных приборов характеризуются чередованием периодов работы и периодов хранения (ожидания), причем в зависимости от назначения аппаратуры соотношение между этими периодами может быть различным. Во время работы может произойти такое изменение параметров электронных приборов, которое обусловит появление отказа в процессе последующего хранения. С другой стороны, изменение параметров электронных приборов при хранении может быть настолько значительным, что это вызовет отказ при работе аппаратуры. Переходные режимы при включении и выключении аппаратуры также оказывают существенное влияние на ее надежность, приводя к значительно большему числу отказов при циклическом режиме работы по сравнению с нейтральным.

Таким образом, между хранением и работой электронных приборов, а также циклическими или непрерывными нагрузками существует определенная связь, которую необходимо исследовать при проведении натурных испытаний в различных климатических зонах. Для этого при выборе условий испытаний целесообразно предусмотреть испытания:

а) в условиях и режимах, имитирующих эксплуатацию в составе аппаратуры (при непрерывной или циклической нагрузке);

б) в условиях, имитирующих периодическое функционирование при хранении в составе аппаратуры.

Испытания а) проводят для определения влияния климатических факторов и электрических нагрузок на срок службы и ресурс электронных приборов при эксплуатации в составе аппаратуры без ее консервации и упаковки.

Испытания б) выполняют для определения влияния климатических факторов на срок службы, ресурс и срок сохранности электронных приборов при периодическом функционировании во время хранения в составе аппаратуры. В перерывах между функционированием электронные приборы или аппаратура могут храниться без консервации и упаковки или с консервацией и в упаковке.

Режимы периодического функционирования, непрерывной и циклической работы, имитируемые подачей на изделия соответствующих электрических нагрузок, являются важным условием проведения натурных испытаний и должны устанавливаться программой испытаний.

Для сопоставимости и взаимного дополнения результатов испытаний условия и режимы испытаний в различных климатических зонах, а также местах размещения должны быть идентичными. Это позволяет выделить влияние климатических факторов на эксплуатационные показатели электронных приборов.

3.4. Назначение и оборудование климатических испытательных станций

Комплексные исследования и всесторонние испытания электронных приборов в естественных условиях окружающей среды могут быть выполнены только на специально оборудованных климатических испытательных станциях.

В отличие от узкоспециализированных коррозионных станций, проводящих исследования коррозионной устойчивости образцов материалов и покрытий в атмосферных условиях, климатические испытательные станции для испытаний электронных приборов должны выполнять значительно больший объем работ, имеющих специфические особенности.

Климатические испытательные станции предназначены для исследования влияния климатических и эксплуатационных факторов на сохраняемость и долговечность электронных приборов, а также на стойкость материалов и покрытий, применяемых при их изготовлении. На климатических испытательных станциях должны проводиться также исследования процессов изменения параметров и свойств электронных приборов в различных условиях эксплуатации и хранения.

Практика показала, что для выполнения основных целей испытаний электронных приборов в естественных условиях на климатических испытательных станциях необходимо проводить следующий комплекс работ:

— испытания электронных приборов в условиях и режимах, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации и хранения;

— испытания образцов материалов и покрытий, консервационных и упаковочных средств, средств постоянной и временной защиты в различных местах хранения (под навесом, на открытой площадке и т. д.);

— измерение и регистрация климатических факторов в местах испытаний электронных приборов и в месте расположения станции;

— сбор, анализ и обобщение данных о воздействующих климатических факторах, условиях и результатах эксплуатации и хранения электронных приборов в климатической зоне, где расположена испытательная станция;

— исследование характера воздействия климатических факторов на испытываемые на станции электронные приборы, а также исследование причин изменения их параметров и свойств неразрушающими методами;

— обработка и анализ результатов исследований и испытаний.

Механизм и характер физико-химических процессов, протекающих в изделиях при воздействии климатических факторов, можно определить только на базе сравнительных испытаний в различных климатических зонах. Поэтому для проведения исследований физики процессов в электронных приборах и для оценки их показателей при повсеместной эксплуатации во всех наземных климатических условиях следует создать сеть испытательных станций в различных климатических зонах. В этом случае натурные испытания дадут необходимую информацию для повышения качества изделий, совершенствования методов их испытаний и оптимизации условий применения.

Климатические испытательные станции следует размещать вблизи представительных пунктов климатических зон и районов, выбранных для натурных испытаний электронных приборов. Проведение испытаний в пунктах, указанных в табл. 3.1, дает возможность распространить результаты исследований на каждой станции на климатическую зону в целом, а результаты сравнительных исследований — на всю территорию СССР. Таким образом, могут быть получены объективные данные об основных показателях надежности и стойкости электронных приборов при их эксплуатации и хранении в различных климатических условиях на территории СССР.

Перечисленный комплекс задач при исследованиях и испытаниях электронных приборов выдвигает специфические требования к сооружениям и оборудованию климатических испытательных станций.

При проведении сравнительных натурных испытаний основным принципом, обеспечивающим возможность определить степень влияния различных климатических факторов на изделия, является адекватность всех условий и режимов испытаний, кроме, конечно, действия самих факторов. Поэтому, как было указано в § 3.2, для сопоставимости и взаимного сравнения результатов испытаний испытательные станции в различных климатических зонах следует оснащать идентичными сооружениями, оборудованием и приспособлениями. Кроме того, при размещении самих станций, а также сооружений и оборудования на их территории необходимо руководствоваться одними правилами.

Таким образом, при создании нескольких испытательных станций следует разрабатывать единый план их размещения и типовой комплекс сооружений, оборудования и приспособлений, которые дадут возможность обеспечить воспроизводимость результатов испытаний и провести сравнительный их анализ.

Анализ отечественного и зарубежного опыта показал, что для проведения испытаний электронных приборов, образцов и материалов в различных условиях размещения и хранения климатические испытательные станции должны иметь открытые площадки с естественным грунтом, приспособленные для испытаний и размещения метеоплощадки, навесы и неотапливаемые помещения.

Кроме сооружений, для проведения испытаний на испытательных станциях необходимо предусмотреть помещения для проведения лабораторных исследований, измерений параметров изделий и образцов, обработки результатов испытаний, а также помещения для проведения ремонтных работ, работ по подготовке изделий к испытаниям, их консервации, упаковке и подготовке к отправке.

Для нормального функционирования станций следует оборудовать также необходимые вспомогательные сооружения, такие, как электроподстанция, котельная, склады материалов, гараж, помещение охраны и т. д.

Участок, выбираемый для размещения сооружений и оборудования испытательных станций, должен, по возможности, быть в непосредственной близости от источников энергии и водоснабжения, располагаться на равнинной местности, не затапливаемой паводковыми и ливневыми водами, на естественном грунте с травянистым покровом высотой не более 15 см. Подъездные дороги к участку, а также дороги на его территории должны иметь искусственное покрытие. На участке и в непосредственной близости от него не должно быть застоя талой и дождевой воды, болот, больших рек, промышленных и других сооружений, создающих микроклимат. Ограж-

дение участка не должно мешать свободной аэрации. Сооружения станции следует размещать на участке так, чтобы они не затеняли открытые площадки и не препятствовали свободной аэрации, а размещение их производить с учетом «розы ветров» для уменьшения загрязнения атмосферы станции продуктами сгорания при отоплении помещений.

Открытые площадки необходимо располагать на участке местности с незначительным общим уклоном (от 2 до 3°) естественного рельефа. Уровень поверхности площадки должен быть выше уровня

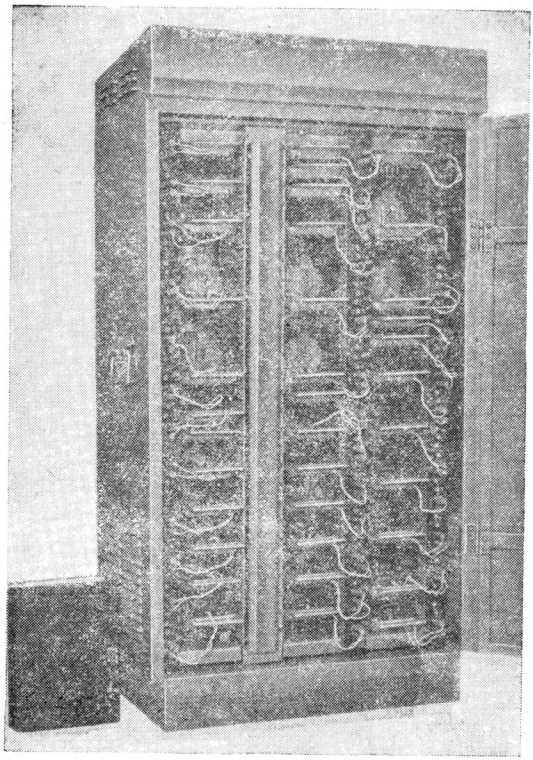


Рис. 4. Контейнер, имитирующий кожух аппаратуры, с кассетами для испытаний изделий электронной техники.

грунтовых вод не менее чем на 0,5 м. Площадки должны быть прямоугольной формы и, по возможности, ориентированы короткой стороной в направление преобладающих ветров. Открытые площадки и местность вокруг них на расстоянии 10 м следует очистить от растительности. На открытой площадке, как правило, необходимо размещать изделия, подлежащие испытаниям в этих условиях, образцы материалов и покрытий, а также метеоплощадки.

Для проведения испытаний изделий в условиях и режимах, имитирующих эксплуатацию в составе аппаратуры, открытые площадки следует оборудовать специальными настилами, на которых должны быть размещены контейнеры с изделиями или аппаратура.

При испытаниях электронных приборов в условиях, имитирующих их эксплуатацию и хранение в составе аппаратуры, хорошо зарекомендовали себя специальные контейнеры с жалюзи, в которые устанавливаются испытываемые электронные приборы. Они имитируют кожухи негерметизированной или уплотненной аппаратуры, надежно защищают электронные приборы от непосредственного воздействия солнечных лучей и атмосферных осадков, но не препятствуют циркуляции воздуха. Электронные приборы для установки в контейнеры целесообразно распаивать в специальные кассеты, что облегчает измерения и подачу электрической нагрузки на приборы при их испытаниях. На рис. 4 показан контейнер с кассетами, применяемый при проведении испытаний интегральных микросхем, радиодеталей, радиокомпонентов и полупроводниковых приборов в естественных условиях.

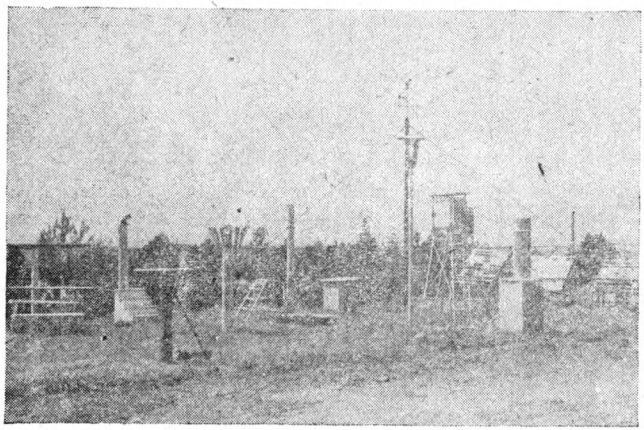


Рис. 5. Размещение метеоплощадки и ее оборудования.

Контейнеры и кассеты оборудованы приспособлениями и кабелями для подачи напряжения на испытываемые изделия.

Для проведения испытаний образцов материалов и покрытий открытые площадки следует оснащать стендами для экспозиции образцов, обеспечивающими возможность располагать образцы под изменяющимся углом наклона по отношению к земле, например, в 45°, а также вертикально или горизонтально. Стенды, как правило, ориентированы лицевой стороной на юг, однако при испытаниях в приморских районах при их расположении необходимо учитывать преимущественное направление бризовых ветров, насыщенных морскими солями.

Метеоплощадки следует размещать в центре открытых площадок таким образом, чтобы расположенные вокруг стенды с образ-

цами материалов и покрытий, аппаратура и контейнеры не оказывали влияния на показания измерительных приборов и метеоприборов (рис. 5).

Для всестороннего изучения климатических факторов, воздействующих в месте размещения испытательных станций, метеоплощадки надо оснащать комплектом приборов и устройств для измерения и регистрации параметров атмосферы. К ним относятся термометры сопротивления типа ТСП-23, термометры максимальные типа ТМ-1 и минимальные типа ТМ-2, термографы для измерения и регистрации температуры, гигрографы типа М-32Н, гигрометры типа М-39 и аспирационные психометры типа М-34 для измерения и регистрации относительной влажности, росографы типа М-35 для регистрации продолжительности сохранения росы, плювиографы типа

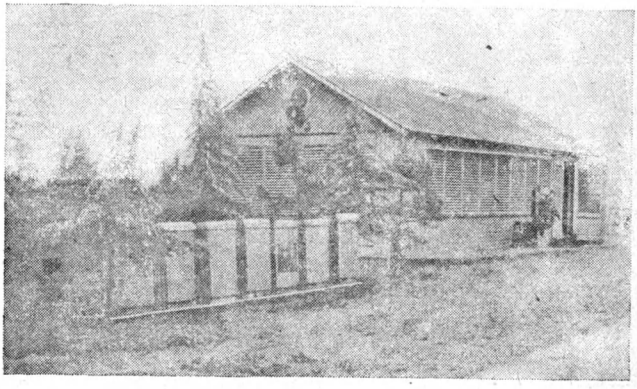


Рис. 6. Типовой навес и контейнеры для испытаний электронных приборов.

П-2 для определения количества и продолжительности осадков, гелиографы типа ГУ-1 для регистрации продолжительности солнечного сияния, пиранометры типа М-80 для определения суммарной интенсивности солнечной радиации, барометры типа СР-А для измерения атмосферного давления, анеморумбометры типа М-63М для определения направления и скорости ветра и др. [22].

Кроме того, метеоплощадки целесообразно оснащать датчиками для непрерывной регистрации времени увлажнения поверхности, т. е. продолжительности смачивания [24], а также приспособлениями для определения коррозионной агрессивности атмосферы (стаканы для улавливания пыли, сухое полотно для определения засоленности атмосферы).

Перечисленные приборы следует устанавливать на метеоплощадках с помощью специального оборудования и приспособлений (рис. 5). Так, метеоприборы следует располагать в метеобудках или на специальных стойках, а сухое полотно выставлять на специальных стендах с навесом.

Размещение и ориентацию приборов и оборудования на метеоплощадках необходимо проводить в соответствии со стандартами гидрометеослужбы.

Большинство электронных приборов при испытаниях в естественных условиях размещается под навесом и в неотапливаемом помещении. Конструкции этих сооружений и их оборудование должны быть максимально приближены к реальным условиям, в которых хранятся и эксплуатируются электронные приборы.

Навесы должны предохранять изделия от прямого воздействия осадков или солнечных лучей, но не препятствовать естественной циркуляции воздуха. Практика натурных испытаний электронных приборов показала, что наилучшей конструкцией навеса является навес со сплошной обшивкой стен на высоту 1,5 м от пола, далее

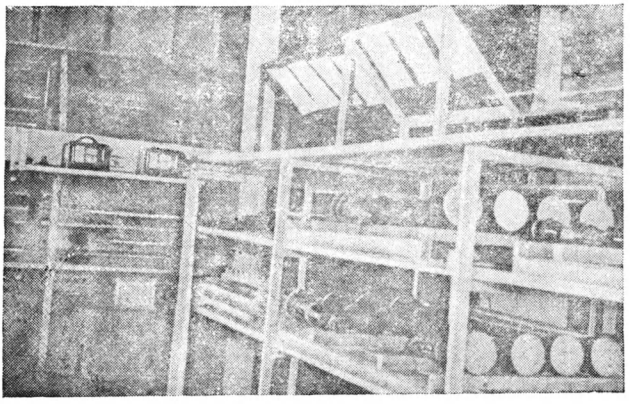


Рис. 7. Размещение электронных приборов и метеоприборов под навесом.

до крыши стены должны быть выполнены в виде двойных жалюзей с наклоном ребер под углом 45° (рис. 6). Крыша навеса должна быть деревянной, двойной и покрыта шифером или черепицей, так как крыши, крытые железом или толем, сильно нагреваются солнцем, что вызывает повышение температуры и уменьшение относительной влажности воздуха под навесом, а следовательно, искажает микроклимат сооружения. Навесы необходимо оборудовать полом, имеющим уклон от середины к краям от 1 до 2° и рассчитанным на нагрузку стеллажей и контейнеров с испытываемыми изделиями.

Под навесом следует размещать стеллажи, шкафы и контейнеры с испытываемыми изделиями и их узлами, стенды с образцами материалов и покрытий, а также метеопост, расположенный на уровне 1,5 м от пола и оборудованный термографом, гигрографом и аспирационным психометром (рис. 7, 8, 9). Навесы целесообразно размещать на местности, ориентируя короткую их сторону в направлении господствующих ветров.

Сооружаемые на испытательных станциях неотапливаемые помещения должны обеспечивать защиту испытываемых изделий от атмосферных осадков, солнечной радиации, пыли, песка, ветра, резких перепадов температуры и относительной влажности наружного воздуха. Поэтому они выполняются со сплошными деревянными, каменными или бетонными стенами. В неотапливаемых помещениях следует предусмотреть естественную или искусственную вентиляцию. Все остальные требования к оборудованию неотапливаемых помещений аналогичны требованиям к оборудованию навесов.

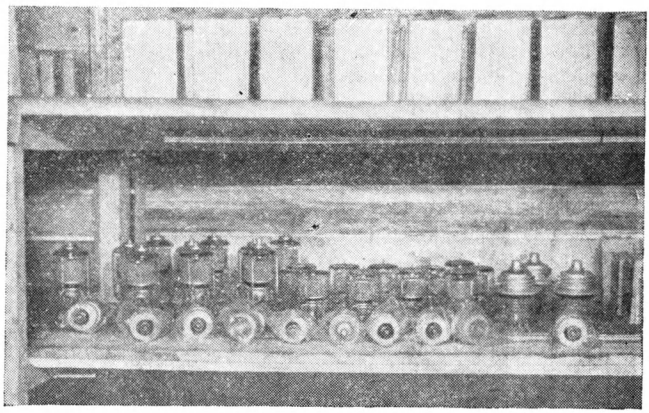


Рис. 8. Размещение электронных приборов на стеллажах.

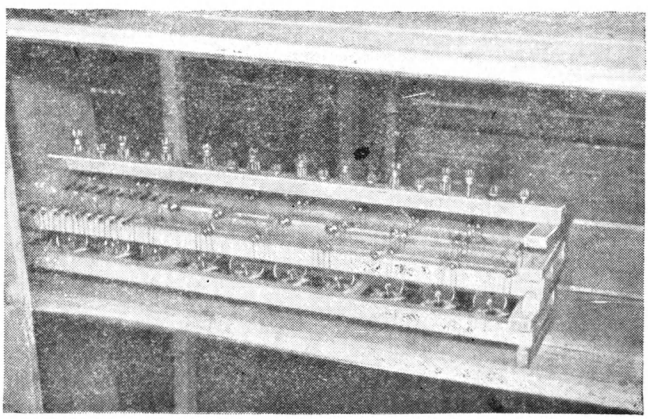


Рис. 9. Размещение электронных приборов в приспособлениях на стеллажах.

Оборудование и объем помещений лабораторного корпуса испытательных станций должны обеспечивать:

— проведение измерений параметров испытываемых электронных приборов;

— проведение анализа причин отказов изменений параметров и свойств испытываемых приборов и материалов;

— проведение анализа коррозионной агрессивности атмосферы и других химико-аналитических работ;

— обработку результатов испытаний;

— распаковку, переконсервацию и упаковку изделий и образцов.

Тщательное и точное измерение параметров электронных приборов в процессе натурных испытаний является важнейшим условием, обеспечивающим эффективное выполнение эксперимента в целом. Практика показала, что для воспроизводимости результатов измерений необходимо, чтобы средства измерений находились всегда в нормальных климатических условиях.

Кроме того, воспроизводимость измерений параметров, изменяющихся в результате необратимых изменений свойств изделий при воздействии климатических факторов в процессе испытаний, может быть обеспечена предварительной выдержкой изделий перед началом измерений в нормальных климатических условиях и проведением измерений в этих условиях.

Поэтому в помещениях испытательных станций, предназначенных для хранения средств измерений для предварительной выдержки испытываемых приборов и измерения параметров большинства электронных приборов, необходимо поддерживать значения основных климатических факторов в пределах: температура воздуха 15—35°С, относительная влажность 40—80%, атмосферное давление $840 \cdot 10^2$—$1060 \cdot 10^2$ Па (630—800 мм рт. ст.).

Некоторые параметры электронных приборов (например, сопротивление изоляции трансформаторов, коэффициент усиления, прямое падение напряжения полупроводниковых приборов и др.) существенно зависят от изменения значений температуры и влажности при измерениях.

Поэтому, если на параметры этих электронных приборов или средств измерений существенно влияет изменение температуры и относительной влажности в пределах, установленных выше, измерения и предварительную выдержку перед измерениями следует проводить при стандартных климатических условиях. Для этого часть измерительной лаборатории необходимо оборудовать устройствами для кондиционирования воздуха, обеспечивающими поддержание температуры 20±1°С и относительной влажности 65±2%.

Измерительные лаборатории климатических испытательных станций следует оборудовать метеопостами для контроля и регистрации нормальных и стандартных климатических условий.

Испытательные станции должны иметь комплект радио- и электроизмерительных приборов, обеспечивающих измерения основных электрических параметров — критериев годности — испытываемых электронных приборов (рис. 10, 11). Ввиду высокой стоимости и сложности средств измерений большинства классов и типов электронных приборов на испытательных станциях должны находиться только те измерительные приборы, которые предназначены для измерения наиболее чувствительных к воздействию климатических факторов параметров.

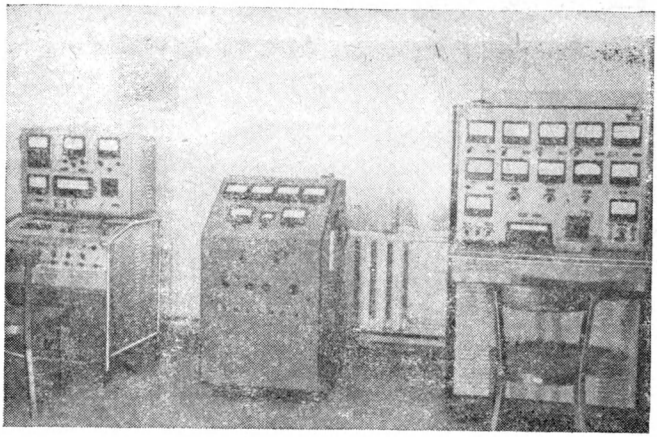


Рис. 10. Оборудование участка измерений параметров приемно-усилительных ламп.

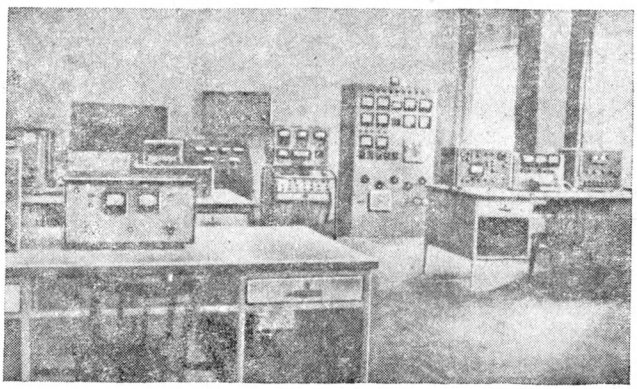


Рис. 11. Оборудование участка измерений параметров электровакуумных приборов.

Лаборатории климатических испытательных станций необходимо оснащать оборудованием и приборами для проведения исследований методами неразрушающего контроля. Объем этих исследований на станциях должен обеспечить, не прерывая испытаний, проведение предварительного анализа основных внутренних причин изменения параметров и свойств электронных приборов и материалов.

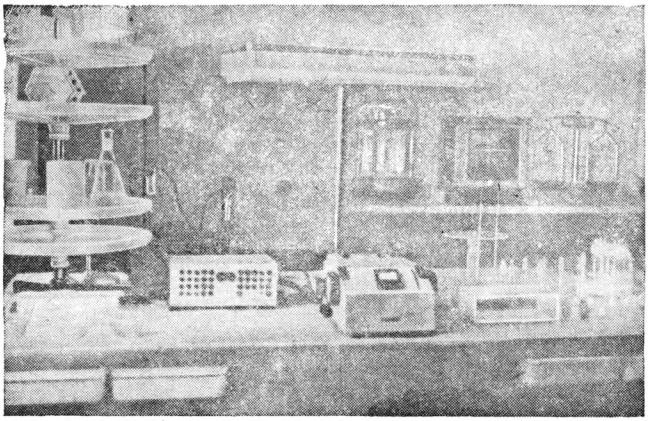


Рис. 12. Оборудование химического участка.

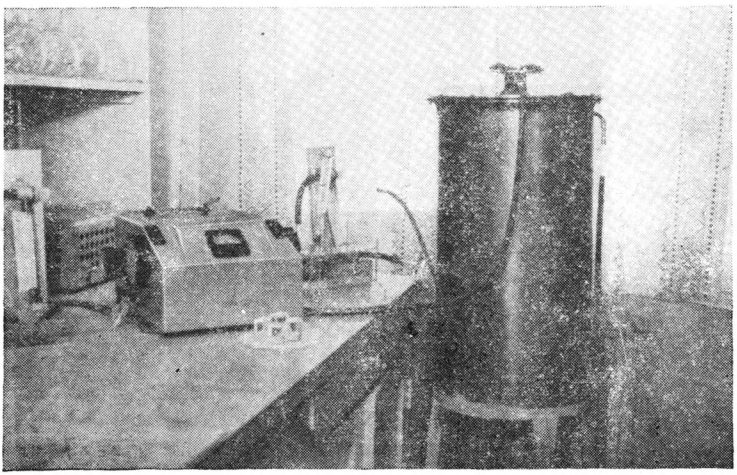


Рис. 13. Оборудование для анализа рабочих растворов при определении коррозионной агрессивности атмосферы.

Поэтому испытательные станции следует укомплектовывать средствами локальной и интегральной диагностики.

Для систематического анализа коррозионной агрессивности атмосферы, а также для исследования коррозионных поражений испытываемых образцов и приборов разрушающими химико-аналитиче-

скими и другими методами на испытательных станциях следует оборудовать химические участки (рис. 12). Эти участки должны быть укомплектованы необходимыми материалами, реактивами и аппаратурой (электроаспираторами, газоанализаторами, фотоэлектрокалориметрами и др.) (рис. 13). Оборудование и вентиляция помещений химических участков должны соответствовать действующим нормам и правилам.

В лабораторных корпусах испытательных станций должны быть установлены источники и блоки питания для подачи напряжения на испытываемые изделия, а также стабилизаторы тока для обеспечения питания измерительных приборов. Таким образом, оборудуя климатические испытательные станции, следует учитывать специфические требования, выдвигаемые при проведении исследований влияния климатических и эксплуатационных факторов на электронные приборы.

4. Подготовка и проведение натурных испытаний

4.1. Общие положения

Перед началом натурных испытаний необходимо определить номенклатуру и количество изделий и образцов, подлежащих испытаниям, провести подготовку изделий к испытаниям и выбор метрологического обеспечения исследований.

При планировании натурных испытаний должны учитываться специфика эксплуатации и хранения электронных приборов, их свойства, а также характер ожидаемых физико-химических процессов в изделиях при климатических воздействиях, поэтому целесообразно специально рассмотреть основные методы подготовки и проведения испытаний, от которых в наибольшей степени зависит эффективное выполнение целей исследований.

4.2. Определение номенклатуры и количества изделий, подлежащих испытаниям

Специфика натурных испытаний, являющихся по своей сути средством комплексных исследований, а не методом оперативной оценки качества продукции, предопределяет особый подход к выбору номенклатуры и количества изделий, подлежащих испытаниям.

При натурных испытаниях проверяются основные конструктивные принципы, новые материалы, перспективные изделия и способы защиты электронных приборов от воздействия климатических факторов. Поэтому натурным испытаниям целесообразно подвергать вновь разрабатываемые или модернизируемые изделия, а также выпускаемые серийно изделия с устойчивыми технологическими процессами изготовления.

Для отработки способов защиты от воздействия климатических факторов в целях сокращения стоимости работ натурным испытаниям могут быть подвергнуты отдельные узлы сложных и дорогостоящих приборов (например, специальных ЭВП). В некоторых случаях при планировании сравнительных натурных испытаний уникальных и дорогостоящих приборов можно допустить к испытаниям приборы, отдельные параметры которых имеют отклонения от требований стандартов или технических условий, позволяющие, однако, оценить относительное влияние климатических факторов на эти приборы. Для исследования стойкости материалов и покрытий, применяемых при изготовлении электронных приборов, рекомендуется одновременно с испытаниями приборов испытывать в идентичных условиях образцы, выполненные по единой технологии с приборами и отвечающие требованиям нормативно-технической документации.

При проведении натурных испытаний возможно и необходимо применение принципа группирования изделий различных типов, типономиналов и рядов на основе теории подобия. Суть заключается в том, что электронные приборы, имеющие одну базовую конструкцию или конструктивное оформление (конструктивно подобные), близкие по технологии изготовления и применяемым материалам (подобные по начальным условиям), близкие по функциональному назначению (подобные по граничным условиям), подобные по параметрам — критериям годности и ожидаемым процессам деградации (определяющие критерии подобия равны), объединяются в одну группу. Опыт лабораторных и натурных испытаний электронных приборов показал, что именно эти качества определяют характер и степень зависимости эксплуатационных характеристик изделий от воздействия климатических факторов.

Так, например, стойкость резисторов к воздействию климатических факторов зависит в основном от материала резистивного слоя и качества его исполнения, конструкции сопряжения элементов между собой (резистивного слоя с системой выводов, колпачка с выводом) и взаимодействия материалов, из которых выполнены элементы резистора, с окружающей средой.

Стойкость конденсаторов к воздействию климатических факторов главным образом определяется типом диэлектрика, материалом обкладки, типом пропитки и конструктивным выполнением. Поэтому изделия указанных подклассов могут быть объединены в группы и подгруппы, как показано в табл. 4.1.

Таким образом, проведя предварительное группирование изделий, можно испытывать только представительные типы группы изделий, характеризующие данную группу с точки зрения воздействия климатических факторов, а затем распространить результаты испытаний на все изделия, входящие в группу. Очевидно, что такой подход резко сокращает объем и стоимость испытаний и позволяет во многих случаях оценить влияние климатических факторов на вновь разрабатываемые изделия, по которым еще не накоплено достаточное количество данных, и повысить достоверность исследований, используя результаты других испытаний различных изделий, входящих в группу.

Одним из основных вопросов при подготовке к проведению натурных испытаний является определение количества изделий, подлежащих испытаниям. Ввиду того что количество испытываемых изделий во многом определяет объем и стоимость испытаний, необходимо стремиться к его сокращению. С другой стороны, количество

Таблица 4.1

Пример группирования изделий для выбора характерных „представителей“ группы

	Наименование подкласса	Наименование группы	Наименование подгруппы
Резисторы	Постоянные непроволочные	Углеродные и бороуглеродистые Керметные и металлоокисные Композиционные объемные и пленочные Тонкослойные металлизированные	Неизолированные Изолированные Герметизированные
	Переменные непроволочные	Композиционные Композиционные поверхностные Металлопленочные поверхностные	
	Постоянные проволочные	Проволочные на керамической основе Проволочные эмалированные трубчатые	
Конденсаторы	Постоянной емкости	Бумажные Металлобумажные	Герметизированные
		Слюдяные	Опрессованные Герметизированные
		Пленочные Металлопленочные Керамические Комбинированные Лакопленочные Танталовые Танталониобиевые Ниобиевые Алюминиевые	Уплотненные Герметизированные
	Постоянной емкости высоковольтные (до 2 кВ)	Полистирольные или из сополимеров стирола Фторопластовые Полиэтиленовые терефталатные Поликарбонатные	

изделий в каждом условии и режиме испытаний должно обеспечивать с заданной точностью и достоверностью определение характера изменения параметров и количества отказов изделий в процессе испытаний, сравнительную оценку результатов и определение количественных соотношений между различными условиями и режимами испытаний, а также построение физико-математических моделей.

В общем случае определение количества изделий в одном условии испытаний должно проводиться с учетом:

— предварительной информации о поведении изделий в различных климатических условиях;

— требуемой длительности испытаний и количества промежуточных съемов с испытаний;

— целей и условий испытаний;

— стоимости и сложности изделий;

— трудоемкости и сложности измерений;

— методов обработки результатов испытаний.

Следует отметить, что разработанные к настоящему времени методы обработки и анализа результатов натурных испытаний, изложенные в гл. 5 и 6, позволяют с достаточной точностью и достоверностью проводить анализ, оперируя весьма малыми количествами изделий в выборке (минимальное количество приборов в выборке в одном условии или режиме испытаний может составлять 3—5 шт.), что особенно существенно при испытаниях дорогостоящих и уникальных приборов.

Количество образцов материалов и покрытий в одном условии испытаний определяется с учетом длительности испытаний и числа промежуточных съемов, причем их минимальное количество в конце испытаний не должно быть менее 3—5 шт.

Общее количество изделий или образцов данного типа, подлежащих натурным испытаниям, в различных климатических зонах определяется исходя из количества режимов и условий испытаний, количества контрольных образцов, а также способов организации контрольных измерений и осмотра внешнего вида.

4.3. Подготовка изделий к испытаниям

Тщательная подготовка изделий и образцов материалов и покрытий к испытаниям во многом определяет успешное выполнение целей исследований.

Перед началом испытаний необходимо выбрать контролируемые параметры изделий, а также критерии оценки изменений внешнего вида изделий и образцов. При выборе параметров, подлежащих измерениям в процессе натурных испытаний, необходимо исходить из предварительного анализа влияния климатических факторов на изменение свойств данного или аналогичного типа изделия с тем чтобы измеряемые параметры были наиболее чувствительны к климатическим воздействиям и в дальнейшем могли служить параметрами — критериями годности — испытываемых изделий. Правильный выбор контролируемых параметров необходим не только для оценки влияния климатических факторов на свойства изделий, от которых зависят эти параметры, но также и для определения методов прогнозирования поведения изделий при воздействии факторов окружающей среды.

Таблица 4.2

Параметры электровакуумных приборов, подлежащие измерениям при натурных испытаниях

Наименование группы	Наименование подгруппы	Контролируемые параметры
Приемно-усилительные лампы	Частотно-преобразовательные и комбинированные	Крутизна характеристики анодного тока или анодный ток, обратный ток первой сетки, выходная мощность, импульсный ток анода
	Лампы для работы в непрерывном режиме	Колебательная мощность, обратный ток первой сетки, колебательная мощность при недокале
Генераторные и модуляторные лампы	Лампы для работы в импульсном режиме	Мощность и ток анода в импульсе, мощность и ток анода в импульсе при недокале, обратный ток первой сетки, электрическая прочность
	Кенотроны высоковольтные	Устойчивая работа в основном эксплуатационном режиме, ток анода или падение напряжения
Электронно-лучевые приборы	Трубки индикаторные, осциллографические однолучевые и многолучевые	Модуляция, яркость экрана, разрешающая способность, время готовности
	Трубки приемные и проекционные телевизионные	Разрешающая способность, модуляция, яркость экрана

Большинство электронных приборов имеет четыре-пять и больше параметров, измеряемых при контроле качества в процессе производства, поэтому рациональный выбор ограниченного числа необходимых параметров, критичных к воздействию климатических факторов, значительно сокращает объем измерений при натурных испытаниях, а следовательно, и стоимость работ в целом.

Основным критерием при выборе контролируемых параметров является то, насколько эти параметры отражают механизм процессов и изменения свойств, протекающих в изделиях при воздействии дестабилизирующих факторов в естественных условиях окружающей среды.

В табл. 4.2 в качестве примера на основании анализа комплексных лабораторных и натурных испытаний [19] дан перечень пара-

метров отдельных групп электровакуумных приборов, подлежащих измерениям при натурных испытаниях.

Критериями при внешнем осмотре изделий и образцов могут служить изменение цвета и блеска покрытий, поматовение поверхностей, наличие и местоположение допустимых дефектов, покрытий на отдельных деталях и элементах.

Перед началом испытаний отобранные изделия и образцы следует выдержать в нормальных или стандартных климатических условиях в течение времени, необходимого для стабилизации параметров, после чего произвести первоначальное измерение контролируемых параметров изделий или взвешивание образцов, коррозионные потери которых определяются по изменению массы.

Первоначальные измерения параметров и внешний осмотр целесообразно проводить в нормальных или стандартных климатических условиях с помощью заранее эталонированных и поверенных измерительных приборов, имеющих соответствующие свидетельства.

Номенклатура измерительных приборов, применяемых для измерений параметров изделий в процессе натурных испытаний, определяется в основном номенклатурой измеряемых параметров и методиками измерений. Однако при выборе метрологического обеспечения натурных испытаний необходимо учитывать их специфику, заключающуюся в том, что в процессе длительных испытаний изменения параметров изделий, как правило, незначительны, а измерительные приборы, предназначенные для измерения параметров изделий, так же, как и изделия, находятся на длительном хранении. Поэтому следует учитывать возможное ухудшение с течением времени точности измерительных средств и предусматривать соответствующий уровень метрологического запаса, с тем чтобы ухудшение метрологических свойств измерительных приборов не привело к неправильной оценке результатов испытаний.

Расчет метрологического запаса при выборе контрольно-измерительных средств для проведения натурных испытаний может базироваться на вероятностных критериях метрологического обеспечения, представляющих собой вероятность нахождения определяющего параметра изделия в пределах допуска на него после окончания операции измерения. Расчетные соотношения и графики, предложенные В. Н. Сретенским и В. М. Криксуновым [20], позволяют, исходя из заданных на конец срока испытаний показателей эксплуатационных свойств изделий, поля допуска на параметры изделий и погрешности измерительных средств, определить необходимые точностные характеристики измерительных приборов.

После выбора измерительных приборов и измерения параметров изделий, подлежащих испытаниям, необходимо провести сплошной неразрушающий контроль их методами интегральной или локальной диагностики для выявления скрытых дефектов производства, не обнаруженных при измерениях электрических параметров. В зависимости от классов изделий эти методы могут быть различными. Например, для радиодеталей можно применить интегральные методы: измерение совокупности характеристических параметров, измерение уровня токовых шумов резисторов, измерение нелинейности для контроля качества терморезисторов и конденсаторов и т. д., а также локальные методы (рентгенотелевизионный для конденсаторов и тепловой для резисторов) [16].

С помощью методов неразрушающего контроля следует произвести отбраковку потенциально ненадежных изделий, у которых мо-

гут быть конструкционные или технологические отказы. Это дает возможность выявить влияние климатических факторов на возникновение эксплуатационных отказов.

Результаты первоначальных измерений, внешних осмотров и контроля неразрушающими методами необходимо подвергать тщательному анализу, который заключается в фиксации дефектов и отказов и сравнении значений измеряемых параметров с требованиями НТД на изделия и образцы или требованиями методики испытаний.

Результаты измерений параметров изделий следует подвергнуть статистической обработке, т. е. вычислить оценки основных характеристик распределений параметров и исключить резко выделяющиеся измерения методами, изложенными в § 5.2.

Если в изделиях при первоначальном измерении или неразрушающем контроле обнаружены отказы или значения параметров изделий и их внешний вид не соответствуют требованиям НТД, а также если значения параметров отдельных изделий статистически существенно отличаются от остальных значений параметров изделий данной партии, то, как правило, эти изделия испытывать не следует.

Выборка должна быть дополнена до требуемого количества другими изделиями, удовлетворяющими требования НТД. Однако в отдельных случаях в целях сокращения стоимости испытаний для исследований относительных изменений параметров и товарного вида сложных и дорогостоящих изделий, а также для отработки способов их защиты можно испытывать изделия с отклонениями от требований технических условий по отдельным параметрам или внешнему виду, что должно быть оговорено в программе испытаний.

Изделия и образцы, отобранные в результате анализа для проведения натурных испытаний, следует разделить на две партии. Первая партия подвергается натурным испытаниям в естественных условиях различных климатических зон; вторая партия (контрольная) испытывается в отапливаемом (кондиционированном) помещении с нормальными или стандартными климатическими условиями и используется для сравнения. Для проведения натурных испытаний в различных климатических зонах партия делится на равные группы и подгруппы в зависимости от количества испытательных зон, условий и режимов испытаний, с тем чтобы в каждом условии и режиме испытаний находилась самостоятельная подгруппа изделий. Как указывалось выше, количество изделий в каждой группе должно обеспечивать необходимую статистическую достоверность ожидаемых результатов испытаний.

При комплектовании партий, групп и подгрупп следует, по возможности, стремиться к статистической тождественности параметров изделий в каждой выборке (группе, подгруппе) и в партии в целом, для того чтобы при подготовке к испытаниям обеспечить достаточно однородные выборки в каждом отдельном условии и в целом при испытаниях в различных климатических условиях.

Проверку статистической тождественности изделий целесообразно проводить как проверку гипотезы о неизменности распределений параметров в двух выборках, как указано в § 6.2. Все изделия, образцы, упаковка, кассеты, контейнеры и другие приспособления должны быть промаркированы любым способом, не допускающим стирания или смывания маркировки и не нарушающим свойств изделий и образцов.

Изделия, предназначенные для испытаний в кассетах, надо устанавливать в них таким образом, чтобы можно было легко обеспечить подачу на изделия электрической нагрузки и проведение измерений параметров (по возможности, автоматическое) непосредственно в кассете. Схемы распайки и установки изделий и образцов в кассеты зависят от их типа и должны разрабатываться на стадии подготовки испытаний. В силу того что при распайке в кассете могут произойти существенные изменения параметров и свойств изделий, необходимо эту операцию выполнять тщательно и после ее окончания произвести повторный осмотр, измерение параметров и анализ результатов измерений.

Сразу после первоначального измерения параметров, внешнего осмотра и проведения подготовительных мероприятий следует принять меры к тому, чтобы транспортировка изделий на испытательные станции и их хранение до начала натурных испытаний не оказали существенного влияния на свойства и товарный вид изделий. С этой целью все изделия и образцы, подлежащие испытаниям, должны быть упакованы любым способом, защищающим их от механических повреждений и воздействия климатических факторов (особенно повышенной влажности) при транспортировании на испытательные станции. Рекомендуется применять герметичную упаковку или осушители внутри упаковок. Кроме того, аналогично следует упаковывать приборы, которыми производились измерения параметров данной партии или группы изделий и которые будут использованы при дальнейших измерениях на испытательных станциях.

Упакованные изделия, образцы и приборы с сопроводительной документацией (сопроводительным листом, карточкой результатов первоначальных измерений и др.) необходимо уложить в специальные ящики или транспортную тару и в возможно короткие сроки транспортировать на испытательные станции. Транспортная тара и ящики должны обеспечивать надежную амортизацию изделий, особенно ЭВП.

Изделия и образцы необходимо устанавливать на испытания не позднее, чем через 3 месяца после их изготовления, и не позднее, чем через 15 дней после доставки на станцию. В противном случае, а также при нарушении защитных или амортизационных свойств тары и упаковки условия транспортирования и хранения до начала натурных испытаний должны рассматриваться как этап испытаний (испытание на транспортирование и хранение).

Распаковку изделий и образцов, прибывших на испытательные станции, целесообразно производить в нормальных климатических условиях. Изделия следует выдержать в этих условиях в течение времени, необходимого для стабилизации параметров. После этого производится внешний осмотр и выборочное измерение параметров изделий с целью выявления дефектов, которые могут появиться при транспортировании. Если при внешнем осмотре или выборочном измерении параметров наблюдаются дефекты или несоответствие параметров исходным значениям, следует произвести измерение всех контролируемых параметров и по результатам измерений принять решение о целесообразности постановки партии изделий на испытания.

При положительных результатах внешнего осмотра и измерения параметров изделия и образцы материалов и покрытий устанавливают на испытания в условиях и режимах, оговоренных

программой. Ввиду того, что дальнейшее измерение параметров и внешние осмотры изделий целесообразно проводить в течение первого года через 3, 6, 9, 12 месяцев от начала испытаний, а в течение последующих лет через каждые 6 месяцев или год, изделия на испытаний рекомендуется устанавливать в самые влажные периоды года, с тем чтобы получить максимальную информацию о воздействии основных климатических факторов на параметры и свойства изделий, а также материалов и покрытий, применяемых при изготовлении.

4.4. Методика проведения испытаний

Исследования влияния климатических и эксплуатационных факторов на электронные приборы и образцы материалов и покрытий в процессе натурных испытаний следует проводить путем систематических измерений основных климатических факторов, воздействующих на изделия, периодической подачи электрической нагрузки на часть изделий, периодического измерения электрических параметров и внешнего осмотра изделий, а также сравнения полученных результатов, используя при этом физико-химический анализ причин отказов, изменения их свойств и поверхности [19]. Порядок проведения испытаний отдельных групп изделий зависит прежде всего от условий и режимов испытаний, а также от целей исследования.

Так, на изделия, испытываемые в условиях и режимах, имитирующих эксплуатацию в составе аппаратуры, в процессе проведения натурных испытаний должна регулярно (чаще всего непрерывно) подаваться электрическая нагрузка, соответствующая наиболее вероятным или установленным НТД режимам эксплуатации. Характер, величина, продолжительность и периодичность электрической нагрузки (наработка) могут быть различными в зависимости от целей испытаний. Например, для исследования влияния различных нагрузок на изменение параметров и фактический срок службы изделий при их эксплуатации целесообразно проводить испытания при нескольких значениях и при различной длительности воздействия напряжения (в том числе поляризующего). Такие испытания дают ценную информацию для выбора оптимальных режимов применения электронных приборов в различной аппаратуре.

Порядок проведения испытаний изделий в условиях, имитирующих их периодическое функционирование при хранении в составе аппаратуры, несколько иной. На эту группу изделий электрическая нагрузка должна подаваться периодически, в соответствии с наиболее вероятными или установленными НТД режимами тренировки или проверки работоспособности изделий во время или после периода хранения. Характер, величина, продолжительность и периодичность режимов наработки также зависят от целей исследований. Например, для исследования влияния наработки на фактический срок службы, срок сохранности и ресурс, а также на их взаимосвязь рекомендуется производить наработку в течение нескольких промежутков времени по истечении нескольких различных сроков испытаний (например, 50, 75 и 100% общего срока испытаний).

Испытания с периодическим функционированием в условиях хранения позволяют установить влияние процессов, протекающих

при хранении, на работоспособность электронных приборов, а также влияние частичной выработки ресурса на последующую сохраняемость изделий.

Характер, величину, продолжительность и периодичность подачи электрических нагрузок на испытываемые изделия, а также время наступления отказов при наработках следует фиксировать в журналах установленной формы.

При испытаниях в условиях хранения, естественно, не требуется подачи электрической нагрузки. В тех случаях, когда изделия испытываются в составе аппаратуры (или ЗИП), хранящейся с применением средств консервации, необходимо в процессе испытаний производить переконсервацию аппаратуры в сроки, соответствующие реальным срокам этих работ, установленным для испытываемой аппаратуры при ее хранении.

Следует остановиться на порядке и периодичности проведения промежуточных измерений параметров, контроля неразрушающими методами и внешних осмотров испытываемых изделий и образцов. Для исследования влияния дестабилизирующих факторов на отдельные параметры и свойства изделий при выборе условий, сроков и методов проведения промежуточных измерений, контроля и осмотров необходимо исходить из предполагаемого характера процессов, протекающих в изделиях, предполагаемых критериев и методов оценки изменения свойств и возможностей проведения измерений, контроля и осмотра на испытательных станциях.

Если измерение параметров изделий, контроль неразрушающими методами или оценку коррозионных поражений их поверхности при проведении натурных испытаний невозможно осуществить на испытательной станции, изделия и образцы в специальной упаковке в плановые сроки могут быть на время измерений отправлены в лаборатории, оснащенные необходимым оборудованием, а после измерений и анализа неразрушающими методами возвращены для экспозиции. При этом следует учитывать возможность потери информации об обратимых изменениях, происходящих в изделиях, а также обеспечить упаковку и транспортировку таким образом, чтобы не внести существенных изменений в результаты натурных испытаний.

В некоторых случаях оказывается целесообразным снимать в плановые сроки измерений часть изделий и образцов с испытаний и отправлять их в соответствующей упаковке в лаборатории для измерений и исследований разрушающими методами. При этом количество оставшихся изделий и образцов должно быть достаточным для проведения дальнейших испытаний.

Переходя к порядку проведения промежуточных измерений и осмотров изделий и образцов непосредственно на испытательных станциях, необходимо отметить, что в зависимости от характера протекающих в изделиях процессов методика исследований может видоизменяться.

Как было показано в гл. 2, при воздействии климатических факторов в электронных приборах могут возникать длительные и кратковременные обратимые и необратимые процессы. Каждый из этих процессов требует специально подобранного метода оценки. Так, например, изменения внешнего вида или отказы вследствие протекания длительного необратимого процесса коррозии можно оценивать с помощью визуального метода непосредственно в условиях испытаний без выдержки в нормальных условиях.

В то же время в некоторых изделиях воздействие климатических факторов вызывает совместно протекающие обратимые и необратимые процессы. Исследование влияния этих процессов на изменения параметров изделий (например, на изменение сопротивления изоляции трансформаторов) необходимо проводить следующим образом:

— для изучения изменений, вызванных обратимыми процессами, следует измерять параметры без выдержки изделий в нормальных или стандартных климатических условиях;

— для изучения изменений, вызванных необратимыми процессами, измерения параметров нужно проводить после выдержки изделий в нормальных или стандартных климатических условиях в течение времени, необходимого для стабилизации значений параметров.

Практикой натурных испытаний установлено, что существенное влияние на результаты испытаний оказывает изменение метеорологических условий из года в год и от сезона к сезону. Важное значение имеет также начальный период испытаний, так как в этот период у многих изделий и покрытий, как правило, происходят наиболее существенные изменения параметров и свойств. Поэтому промежуточные измерения параметров и внешний осмотр изделий и образцов производят в течение первого года не реже 1 раза в 3 месяца, а затем не реже 1 раза в 6 месяцев. Изделия и образцы покрытий, на свойства которых климатические факторы оказывают особенно сильное действие, следует измерять и контролировать через 1, 2, 3, 6, 9 и 12 месяцев, а далее 1 раз в год.

Для получения достоверных результатов и выявления обратимых изменений параметров целесообразно проводить измерения параметров и осмотр изделий в процессе натурных испытаний в самые влажные и самые сухие периоды года всегда в одно и то же время суток.

Измерение параметров изделий должно производиться в одной и той же последовательности (например, емкость, тангенс угла диэлектрических потерь и сопротивление изоляции). Методы измерений и типы измерительных приборов должны быть установлены в программе испытаний.

При измерении параметров и внешнем осмотре необходимо проводить измерение основных климатических факторов, воздействующих на изделия и измерительные приборы во время этих процедур.

Для установления причин и характера параметрических отказов целесообразно после измерений параметров проводить контроль изделий неразрушающими методами, применяя методы интегральной и локальной диагностики. При этом следует тщательно фиксировать моменты появления (обнаружения) отказов изделий и, по возможности, указывать на причины их возникновения. Если при измерениях без выдержки в нормальных условиях произошел отказ изделия, нужно повторно провести измерение после выдержки в нормальных условиях в течение времени, установленного в частных методиках, и после этого сделать заключение о виде отказа (перемежающийся или устойчивый отказ).

Периодический внешний осмотр каждой детали и каждого элемента изделия с целью определения коррозионных поражений необходимо производить в соответствии с действующей НТД по контролю соответствия изделия предъявляемым требованиям.

При осмотре металлов и гальванических покрытий следует отмечать наличие коррозии на них и указывать места поражения (например, точка коррозии покрытия у основания вывода), характерные особенности продуктов коррозии (плотные, рыхлые, осыпающиеся, цвет). При осмотре неметаллических поверхностей изделий следует отмечать состояние покрытия, отслаивание, меление, трещины, появление продуктов коррозии основы. Осматриваемые изделия и образцы должны сравниваться по внешнему виду с контрольными образцами.

Исследование состояния защитных покрытий, применяемых при изготовлении электронных приборов и испытываемых в виде образцов, производят в соответствии с действующими методиками, стандартами и другой технической документацией [24].

При появлении значительного коррозионного поражения изделий или обнаружении полного отказа в журнале испытаний делают соответствующую запись, изделия и образцы снимают с испытаний, фотографируют на цветную пленку, упаковывают и отправляют на физико-химические исследования в соответствующую лабораторию для установления причин отказов и качественного анализа продуктов коррозии.

При упаковке к каждому изделию и образцу должны быть приложены сопроводительные карточки и цветные фотографии (или негативы).

При проведении натурных испытаний на климатических испытательных станциях должны систематически измеряться и регистрироваться основные климатические факторы в объеме, необходимом для определения их влияния на параметры и свойства изделий [19]. Измерения климатических факторов производят на открытой площадке. Кроме того, измерения температуры, относительной влажности воздуха и продолжительности смачивания поверхности рекомендуется проводить в каждом месте хранения и условиях испытаний, в которых установлены изделия (под навесом, в неотапливаемом помещении) и, по возможности, в контейнерах, упаковках, в кожухах аппаратуры и т. д.).

Измерения температуры, давления и относительной влажности воздуха, количества выпавших осадков, продолжительности сохранения росы, инея, тумана, интенсивности солнечной радиации, количества солнечных часов за сутки, среднесуточной скорости и направления ветра следует производить ежедневно в сроки и методами, установленными действующими инструкциями [22]. Методы измерения параметров коррозионной агрессивности атмосферы определены в соответствующем стандарте [23].

Полученные в результате натурных испытаний данные следует подвергнуть комплексной обработке и анализу с тем, чтобы установить характер процессов, протекающих в изделиях, вызванных воздействием климатических факторов.

Для обеспечения оперативного управления качеством электронных приборов и корректировки программы и методики натурных испытаний комплексная обработка и анализ должны проводиться после каждого срока измерений.

5. Обработка экспериментальных данных

5.1. Выбор методов обработки

При планировании натурных испытаний важной задачей является выбор методов обработки экспериментальных данных, с помощью которых может быть получена информация, необходимая для дальнейшего анализа. Следует стремиться к получению максимума полезной информации, представленной в компактной форме, удобной для хранения и сопоставления с данными других экспериментов.

Специфика натурных испытаний, заключающаяся в периодическом измерении параметров в течение нескольких лет, предопределяет применение методов обработки, позволяющих оперативно оценивать результаты последовательных измерений и делать выводы о целесообразности дальнейших работ или об изменении плана на каждом этапе эксперимента вплоть до его завершения.

Ввиду того что обработка результатов является этапом эксперимента, выбор методов ее проведения должен быть увязан с предыдущими и последующими этапами (планированием и анализом).

При проведении натурных испытаний в различных климатических зонах, режимах и условиях одним из важнейших требований является необходимость возможно большего сокращения количества испытываемых изделий. Если еще при планировании испытаний выбраны методы обработки, позволяющие с достаточной точностью и достоверностью оценить результаты испытаний, оперируя малыми выборками, можно резко сократить объем и стоимость работ.

С другой стороны, если для последующего анализа результатов натурных испытаний заранее выбраны соответствующие методы, объем и сложность процедур при обработке могут быть ограничены необходимым и достаточным минимумом, позволяющим, однако, провести анализ в полном объеме, предусмотренном целями исследований.

Таким образом, в значительной мере выбор методов обработки и успех применения их зависят от системного подхода при планировании эксперимента и выбора спо-

собов анализа его результатов, а также от ясного понимания физического смысла и целей испытаний. Следует выбирать, по возможности, простые и универсальные методы, позволяющие выполнить обработку не только результатов планируемых испытаний, но и испытаний, проводимых другими исследователями (неспланированных экспериментов).

Методы статистической обработки должны предусматривать возможность проведения вычислений с помощью ЭВМ. Методы обработки результатов измерений основных климатических факторов должны учитывать специфику их воздействия, в частности важную взаимосвязь между значениями температуры и относительной влажности, их сочетаниями во времени и повторяемостью. Графическая интерпретация экспериментальных данных должна обеспечивать наглядное представление о тенденциях изменений опытных данных и не требовать большого и сложного процесса вычислений.

Далее описаны некоторые методы обработки результатов натурных испытаний, которые, как показала многолетняя практика, отвечают перечисленным основным требованиям и обеспечивают выполнение различных целей исследований, проводимых с помощью натурных испытаний.

5.2. Статистическая обработка экспериментальных данных

Ввиду того, что большинство данных, получаемых в результате натурных испытаний, является случайными величинами, обработку их необходимо проводить статистическими методами. При этом для сокращения объема вычислений следует из многих разработанных к настоящему времени методов выбрать наиболее рациональные. Анализ и экспериментальная проверка нескольких методов статистической обработки результатов натурных испытаний показали, что достаточно, особенно на первых стадиях исследований, ограничиться вычислением основных параметров распределения случайных величин (математического ожидания, дисперсии и доверительных интервалов), которые со статистической точки зрения полностью характеризуют случайную величину. Необходимо также своевременно оценить ошибки на-

блюдений и измерений и исключить их из дальнейшего рассмотрения.

Таким образом, статистическая обработка результатов эксперимента при натурных испытаниях заключается в вычислении оценок основных характеристик распределения случайных величин (климатических факторов, погрешностей измерений, коррозионных эффектов, количества отказов, изменения параметров электронных приборов и др.), а также в исключении резко выделяющихся значений измеряемых величин.

Предлагаемые методы статистической обработки необходимы и достаточны для выполнения основных целей исследований и дают возможность, оперируя сравнительно малой информацией (размер выборок меньше 20), проводить статистический анализ результатов испытаний для количественной оценки степени жесткости условий испытаний, определения решающих факторов и построения математических моделей влияния климатических факторов на стойкость электронных приборов.

5.2.1. Вычисление оценок основных параметров распределения экспериментальных данных

Для вычисления оценок основных параметров распределения по каждой выборке, характеризующей изменение случайной величины (исследуемых параметров и свойств изделий, количества отказов и т. д.), в каждом условии испытаний для каждого временного сечения (j-го измерения) рассчитывают оценку математического ожидания

$$\overline{X}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_{ij}}{n},$$

где X_{ij} — значение исследуемого параметра i-го члена выборки при j-м измерении; n — объем выборки (например, количество изделий, отказов, измерений, групп, и т. д.).

Оценку дисперсии при j-м измерении рассчитывают по формуле

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_{ij} - \overline{X}_j)^2}{(n-1)}.$$

Для определения достоверности и надежности оценки по заданной доверительной вероятности β для объема выборки $n \geqslant 10$—20 вычисляют доверительный интервал

$$J_{j\beta} = (\overline{X}_j - t_{j\beta}\overline{\sigma}_{\overline{X}_j};\ \ \overline{X}_j + t_{j\beta}\overline{\sigma}_{\overline{X}_j}),$$

где $\overline{X}_j - t_{j\beta}\overline{\sigma}_{\overline{X}_j}$ и $\overline{X}_j + t_{j\beta}\overline{\sigma}_{\overline{X}_j}$ — нижняя и верхняя границы доверительного интервала; $\overline{\sigma}_{\overline{X}_j} = \sqrt{s_j/n}$ — среднеквадратическое отклонение оценки $\overline{X}_j$; $t_\beta = \arg \Phi^* [(1 + \beta)/2]$. Функция $\arg \Phi^*(X)$ обратна функции $\Phi^*(X)$. Значения функции t_β приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

β	t_β	β	t_β
0,80	1,282	0,91	1,694
0,81	1,310	0,92	1,750
0,82	1,340	0,93	1,810
0,83	1,371	0,94	1,880
0,84	1,404	0,95	1,960
0,85	1,439	0,96	2,053
0,86	1,475	0,97	2,169
0,87	1,513	0,98	2,325
0,88	1,554	0,99	2,576
0,89	1,597	0,9973	3,000
0,90	1,643	0,999	3,290

Ввиду того что в процессе проведения натурных испытаний образуется значительный объем информации, целесообразно на основании предварительного анализа исходной информации подвергать статистической обработке только те экспериментальные данные, которые потребуются для дальнейшего выполнения задач исследований.

Опыт проведения натурных испытаний показал, что необходимо проводить вычисление параметров распределения следующих случайных величин: результатов измерений основных климатических факторов (температуры, относительной влажности), оценок основных показателей атмосферостойкости лакокрасочных покрытий (времени потери блеска, меления, начала растрескива-

ния), оценок основных коррозионных поражений металлов и гальванических покрытий (коррозионных потерь, изменений внешнего вида, количества и размера очагов коррозии и др.), результатов измерений электрических параметров, количества отказов электронных приборов, погрешностей измерений и т. д.

При статистической обработке климатических факторов целесообразно вычислять основные параметры распределений среднемесячных, среднесуточных, ежечасных значений температуры и относительной влажности и среднего числа дней с переходами через нулевое значение по месяцам.

Указанная обработка необходима не только для анализа связи между изменениями параметров изделий и изменениями климатических факторов, но и для сопоставления климатических данных за период испытаний на испытательной станции с многолетними наблюдениями Гидрометслужбы для определения степени соответствия между ними. Последнее дает возможность оценить правомерность распространения результатов испытаний, проведенных в месте расположения испытательной станции за относительно короткий срок, на более продолжительное время и на всю климатическую зону, в которой расположена станция.

Статистическая обработка результатов воздействия климатических факторов на параметры и внешний вид изделий необходима для проведения количественного и качественного анализа результатов натурных испытаний. Так, вычисление характеристик распределения значений электрических параметров изделий дает возможность провести графическую интерпретацию полученных зависимостей, количественное сравнение результатов испытаний в различных климатических условиях, выявить определяющие факторы и установить вид математической модели, не прибегая к определению закона распределения случайной величины. Это позволяет значительно сократить объем испытаний и упростить обработку их результатов.

5.2.2. Исключение резко выделяющихся результатов наблюдений

При обработке результатов натурных испытаний, как и при любых других экспериментах, существует возможность появления резко выделяющихся значений

наблюдаемых величин (выбросов). Причинами появления выбросов могут быть изменения климатических условий в момент измерений, погрешность измерительных приборов, ошибки при снятии данных вследствие неумелого или небрежного использования аппаратуры и т. д.

Такие резко выделяющиеся результаты наблюдений квалифицируются как ошибки эксперимента и не учитываются при обработке. С другой стороны, отклонение параметров одного или нескольких изделий в выборке может свидетельствовать о начавшихся в них процессах деградации, которые в дальнейшем приведут к параметрическим отказам. В этом случае резкие отклонения измеряемых величин имеют физическую природу, являются закономерными и их нельзя исключать из дальнейшего рассмотрения при обработке.

Поэтому для исключения резко выделяющихся результатов наблюдений необходимо провести тщательный комплексный анализ возможных причин указанных отклонений. В качестве средства комплексного анализа могут быть использованы критерии, имеющие как физическую, так и статистическую природу. Такими основными критериями являются:

а) нарушение условий измерений. Например, если при измерении параметров произошло резкое изменение напряжения питания, климатических условий и т. д., то результат измерений при этих условиях не учитывается;

б) нарушение метрологических характеристик измерительных приборов. Например, если резко выделяющиеся результаты измерений в определенной серии распределены случайным образом между другими результатами, то можно ожидать, что измерения были выполнены неправильно, и эти результаты не учитываются;

в) статистические критерии. Существуют несколько методов использования статистических критериев, устанавливающих пределы для исключения резко выделяющихся значений случайных величин. Наиболее простой метод состоит в исключении результата наблюдения в том случае, когда отклонение от оценки математического ожидания превосходит 3σ. Но этот метод оправдан при достаточно больших выборках [25]. Для часто используемого критерия Шовене основополагающим

является предположение о нормальном законе распределения случайных величин, что часто неприемлемо [15].

Когда число наблюдений невелико (размер выборок мал), целесообразно применять следующие два метода исключения резко выделяющихся результатов наблюдений [19]:

— метод, основанный на использовании критерия Ирвина;

— метод, основанный на использовании критерия Анскомба.

Если размер выборки совсем мал ($n \geqslant 3$), предпочтительнее использование второго метода.

Применение рекомендуемых статистических критериев дает возможность, не зная и не задаваясь законами распределения случайных величин, провести проверку гипотезы о существенности резкого отклонения результатов наблюдений, оперируя малыми выборками ($n \leqslant 20$).

Следует отметить, что исключение резко выделяющихся результатов наблюдений является весьма ответственной процедурой. Неправомерное отбрасывание таких результатов может привести к неправильным выводам, в то же время игнорирование их может исказить результаты наблюдений, повлиять на величину средних значений и характер аппроксимирующих зависимостей. Поэтому особенно важным является правило обязательного анализа экспериментальных данных при последующих наблюдениях. Специфика натурных испытаний, заключающаяся в периодическом проведении наблюдений, дает такую возможность. Помимо повторных измерений, проводимых минимум три раза в каждый срок наблюдений, для анализа необходимо привлекать данные предшествующих и последующих по срокам наблюдений. Таким образом, следует проверять точность отдельных наблюдений, а также приемлемость и согласованность группы наблюдений, проводимых периодически.

Как можно быстрее необходимо обнаружить неожиданное ухудшение характеристик изделий, проходящих испытания, или измерительных приборов.

Таким образом, нужно сохранять любое наблюдение, которое может дать полезную информацию для окончательного вывода, и исключать любое наблюдение, которое может внести ошибку в усредненные данные. Для этого результаты измерений параметров изделий, исклю-

ченные с использованием статистических критериев при обработке данного наблюдения как «ошибки», необходимо учитывать при анализе последующих наблюдений.

Если при последующих наблюдениях значение контролируемого параметра данного изделия, оцененное как «ошибка» при предыдущем наблюдении, несущественно отличается от значений параметров других изделий результаты этих измерений следует включать в дальнейшую обработку, если же они отличаются существенно, результаты наблюдений не учитываются.

5.3. Табулирование экспериментальных данных

Результаты натурных испытаний, так же, как и любых других экспериментов, целесообразно представлять в виде таблиц. В табличной форме удобно представлять результаты измерений климатических факторов, контролируемых параметров, результаты внешних осмотров испытываемых изделий и т. д.

Для выявления сложной взаимосвязи между изменяющимися климатическими факторами и физико-химическими процессами в изделиях, материалах и защитных покрытиях необходимо производить обработку результатов измерений климатических факторов таким образом, чтобы наиболее точно отразить все возможные значения каждого из воздействующих факторов и их взаимосвязь. Это особенно важно при обработке результатов измерений температуры и относительной влажности воздуха — факторов, которые, как было показано выше, являются основными климатическими факторами, воздействующими на электронные приборы.

Наиболее перспективным является метод совместной обработки результатов измерений значений температуры и влажности в виде температурно-влажностных комплексов [19]. Обработке подвергаются ежечасные наблюдения за период испытаний. Допускается использовать данные срочных измерений (т. е. измерений в 0, 6, 12 и 18 часов), но в этом случае при расчетах следует принимать, что время существования каждого температурно-влажностного комплекса равно 6 часам.

Для более полного представления изменяющегося

температурно-влажностного комплекса, учитывая необходимость тщательного исследования влияния этого комплекса на параметры электронных приборов, значения температуры воздуха следует рассматривать по градациям через 5°С (температуры ниже —10°С по градациям через 10°С), а значения относительной влажности воздуха через 5% (влажность воздуха ниже 30% по градациям не распределяется).

Расчеты желательно производить отдельно по месяцам, сезонам, периодам, между сроками измерений параметров изделий и образцов материалов и за весь рассматриваемый период испытаний в целом.

Таблица 5.2

Суммарная продолжительность температурно-влажностных комплексов (Батуми, открытая площадка, апрель—июль)

Относительная влажность, %	Температура, °С							Повторяемость, %
	0—5	5,1—10	10,1—15	15,1—20	20,1—25	25,1—30	30,1—35	
31—35	—	—	—	—	0,1	0,2	—	0,3
36—40	—	—	—	0,5	0,6	0,4	0,2	1,7
41—45	—	—	0,4	0,7	0,6	0,6	0,2	2,5
46—50	—	0,1	0,3	0,6	0,7	0,5	0,2	2,4
51—55	—	0,1	0,1	1,0	1,1	0,7	0,1	3,1
56—60	—	0,3	0,3	1,2	1,1	1,0	0,1	4,0
61—65	—	0,3	1,1	2,1	2,4	0,8	0,0	6,7
66—70	—	0,5	1,7	2,8	2,5	0,5	—	8,0
71—75	—	2,0	1,7	3,2	4,4	0,3	—	11,6
76—80	—	2,9	3,2	4,5	4,3	0,3	—	15,2
81—85	—	4,0	4,8	4,5	4,5	1,0	0,0	17,9
86—90	0,4	3,5	6,6	5,0	2,1	—	—	17,6
91—95	—	1,0	5,2	0,7	—	—	—	6,9
96—100	—	—	1,1	0,1	—	—	—	2,1
Повторяемость, %	4	147	27,2	27,4	24,9	6,3	0,8	100

Полученные комплексы представляют в виде таблиц, содержащих повторяемости (вероятности) сочетаний различных градаций значений температуры и влажности в процентах от общего числа наблюдений и временные показатели (продолжительность существования комплекса в часах).

Для иллюстрации приведена табл. 5.2, включающая в себя данные по температуре воздуха и относительной

влажности на испытательной станции г. Батуми. В таблице на месте пересечения соответствующих градаций значений температуры и относительной влажности стоят цифры (в процентах от числа наблюдений за этот период), показывающие суммарную продолжительность существования каждого сочетания (температурно-влажностного комплекса).

В нижней строке приведены повторяемости (в процентах) каждой градации температуры, в последнем правом столбце — повторяемости (в процентах) относительной влажности воздуха. Черточки указывают, что температура и относительная влажность воздуха в соответствующих сочетаниях не встречались.

Обработка метеорологических данных в виде комплексных показателей дает возможность получить суммарную продолжительность каждой градации температуры и относительной влажности воздуха как в самостоятельном значении, так и взаимосвязано. Одновременно удается оценить отдельно характер распределения каждого элемента значения экстремальных величин и их вероятность.

Распределение численных характеристик комплексов температуры и относительной влажности по полю таблицы позволяет судить о наиболее частых сочетаниях двух элементов, характерных для климата каждой испытательной станции.

Хотя такая табличная форма обобщения исходных данных довольно громоздка, она необходима для объективного анализа материалов метеорологических наблюдений над основными климатическими факторами.

Результаты измерений других климатических факторов (продолжительности общего увлажнения поверхности, загрязненности воздуха коррозионно-агрессивными агентами, сезонные и суточные изменения температуры, экстремальные значения температуры и влажности и т. д.) целесообразно обрабатывать в виде таблиц месячных значений.

Результаты периодических измерений параметров изделий, внешних осмотров изделий и образцов материалов и покрытий, проходящих натурные испытания, следует обрабатывать в виде таблиц на основе данных журнала испытаний отдельно для каждого условия и режима и для каждого параметра, типа материала или покрытия.

Результаты измерений электрических параметров электронных приборов удобно представлять в таблицах, содержащих оценку среднего значения, а также оценку дисперсии или среднеквадратического отклонения измеряемого параметра при первоначальном измерении и для каждого срока измерений. Кроме того, во многих случаях целесообразно составлять таблицы максимальных и минимальных отклонений измеренных параметров от первоначального значения или таблицы пределов изменения параметров.

Результаты испытаний образцов материалов и покрытий, а также результаты периодических осмотров внешнего вида электронных приборов следует представлять в форме сравнительных таблиц, в которых фиксируется первоначальное состояние внешнего вида и изменения, произошедшие за каждый срок испытаний (осмотров). В таблицах необходимо отмечать потускнение поверхности, наличие и характер налета и слоя продуктов коррозии, характер очагов коррозии металлов и металлических покрытий, потерю блеска, изменение цвета, мелкие растрескивания, отслаивание, коррозию основы и другие разрушения неметаллических покрытий.

Следует подчеркнуть, что выбор формы и содержания таблиц для записи данных о результатах натурных испытаний должен быть направлен на облегчение дальнейшего комплексного анализа и зависит от его целей и методов.

5.4. Графическая интерпретация экспериментальных данных

Результаты измерений случайных величин, полученные в процессе натурных испытаний, изменяются от измерения к измерению во времени. За время испытаний может быть получен большой объем информации, обусловленный множеством выборок, характеризующих изменение исследуемых параметров в различных условиях испытаний и за различное время после начала испытаний.

Для наглядного представления тенденции изменения исследуемых параметров необходима графическая интерпретация экспериментальных данных. Классиче-

ский способ обработки статистической информации, к которому прибегают в большинстве случаев (особенно при обработке результатов испытаний на надежность и сохраняемость), заключается в построении гистограмм, полигонов и т. д. и дальнейшей аппроксимации полученных зависимостей подходящими кривыми. Для этого на основе имеющегося статистического материала необходимо определять интегральные или дифференциальные законы распределения случайных величин.

Однако графическая интерпретация экспериментальных данных классическим методом может выполняться только при больших размерах выборок (количестве измерений, изделий, отказов и т. д.).

При проведении натурных испытаний стремятся к сокращению количества испытываемых изделий и измерений, сохраняя достаточную точность и достоверность результатов. Поэтому применение классического способа при обработке результатов натурных испытаний во многих случаях затруднительно. Кроме того, геометрическое построение законов распределения не дает наглядного представления о тенденции изменения параметров во времени в зависимости от влияния различных факторов.

Учитывая изложенное, наиболее рациональным методом графической обработки результатов натурных испытаний, дающим возможность оперировать малыми выборками, является построение линий регрессии по средним значениям измеряемых параметров во временных сечениях, т. е. функции вида $f[\bar{X}_j/t]$ [25]. Линия регрессии, таким образом, является геометрическим местом центров условных распределений, соответствующих заданным значениям одной из переменных.

Для построения линий регрессии по каждой выборке, в каждом условии испытаний и для каждого временно́го сечения используются вычисленные оценки математических ожиданий рассматриваемых случайных величин. Для полученных линий регрессии в каждой точке (в каждом временно́м сечении) определяют оценку дисперсии и строят доверительный интервал методами, описанными ранее.

Аппроксимирующие кривые, характеризующие результаты измерений в различных условиях, должны наилучшим образом отражать изменения рассматриваемых случайных величин и их тенденцию. Поэтому такие

кривые следует проводить в местах наибольшего сгущения точек, отбрасывая резко выделяющиеся значения. В результате аппроксимации получают графики изменения контролируемых параметров во времени.

В виде линий регрессии, если это возможно, следует представлять и основные измеряемые в процессе натурных испытаний случайные величины (температуру и влажность воздуха, изменения параметров, свойств или количество отказов изделий, изменения внешнего вида материалов и покрытий и т. д.).

Линии регрессии достаточно наглядно отражают воздействие факторов окружающей среды на параметры и

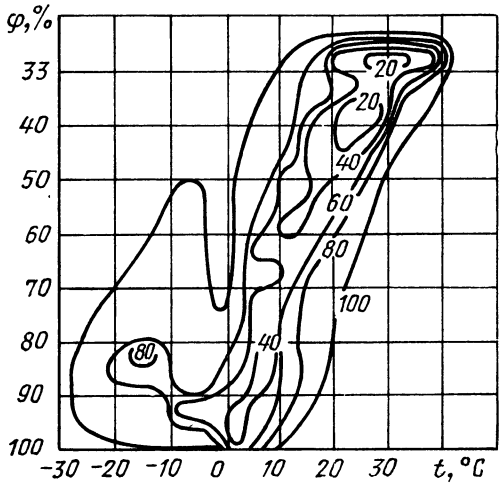


Рис. 14. Климограмма, характеризующая повторяемость значений температурно-влажностного комплекса.

свойства испытываемых изделий, и поэтому с их помощью удается выявить основные тенденции изменения рассматриваемых параметров во времени в различных условиях и режимах испытаний, скорость их изменения, наличие или отсутствие существенных различий между условиями испытаний. Построение линий регрессии по средним значениям измеряемых параметров значительно упрощает и сокращает процесс вычислений.

Для наглядного представления вероятностных характеристик температурно-влажностных комплексов за

различные периоды испытаний целесообразно строить комплексные графики сочетаний значений температуры и относительной влажности воздуха, так называемые климограммы (рис. 14). По оси ординат откладывают значения относительной влажности воздуха, по оси абсцисс — значения температур. Изолинии последовательно ограничивают (оконтуривают) вероятности числа случаев с определенным значением температуры и относительной влажности воздуха по градациям (20, 40, 60, 80, 100%). Центральная изолиния 20% изображает наиболее часто встречающиеся комплексы, которые отмечаются в 20% случаев.

Некоторые результаты наблюдений могут быть представлены в виде обычных графиков зависимости измеряемой величины от времени, например графиков зависимости от времени скорости коррозии, изменения среднемесячной температуры и влажности, концентрации SO_2 в воздухе и т. д.

Иногда в зависимости от целей эксперимента необходимо строить графики суммарной продолжительности явления за определенные отрезки времени, например графики продолжительности и интенсивности солнечной радиации, осадков, числа дней с росой, с переходами температуры через нулевое значение по месяцам и др.

Следует подчеркнуть, что при выборе методов графической интерпретации результатов экспериментов необходимо учитывать цели исследований и способы дальнейшего анализа результатов испытаний.

6. Анализ экспериментальных данных

6.1. Системный подход к проведению анализа

Одним из важнейших этапов комплексных исследований и натурных испытаний является анализ полученной в результате экспериментов и априорной информации, что необходимо для разработки обоснованных выводов.

Для выполнения основных целей комплексных исследований, средством которых являются натурные испы-

тания, анализ экспериментальных данных должен давать возможность:

— оценить основные эксплуатационные характеристики исследуемых приборов;

— установить причины и характер их отказов;

— определить зависимости изменения свойств и параметров от внешних факторов;

— выявить основные факторы и процессы, вызываемые ими в электронных приборах;

— количественно оценить степень соответствия или различия результатов испытаний в нескольких климатических условиях;

— определить характер и механизм физико-химических процессов, протекающих в электронных приборах при воздействии факторов окружающей среды;

— оценить особенности воздействия климатических факторов в различных условиях испытаний и установить критерии для их сравнения.

Разнообразие направлений и характера задач анализа делает необходимым применение системного подхода к его планированию, организации и проведению. Благодаря системному подходу удается разработать рациональный алгоритм проведения анализа, заключающийся в разделении всего процесса на несколько последовательных этапов, в рамках которых выполняется некоторый комплекс работ с определенными целями и по определенному плану. Опыт показал, что наиболее рациональным является проведение анализа в два этапа: 1) анализ экспериментальных данных, полученных в одном условии испытаний; 2) сравнительный анализ и статистическая оценка результатов испытаний в различных условиях. Такое разделение позволяет рационально направлять входящие и исходящие потоки информации и целенаправленно выполнять различные задачи анализа. Так, например, информация, полученная на первом этапе, может быть использована для оперативного управления качеством, а также для правильного планирования и успешного проведения анализа на втором этапе.

Несмотря на различные цели, на каждом этапе анализа целесообразно применять один основной принцип — сравнение. Так, на первом этапе производится сравнение полученных экспериментальных данных с критериями, установленными нормативно-технической до-

кументацией (НТД) или принятыми при исследованиях. На втором этапе производятся сравнительная оценка результатов испытаний в различных условиях статистическими методами, сравнительный анализ климатических условий и результатов испытаний в этих условиях путем метрологических и логических процедур.

Сравнительный анализ дает возможность выявить основные воздействующие факторы, основные процессы, вызываемые ими, их взаимосвязь, что в конечном итоге позволяет определить механизм и характер этих процессов. Разнообразие причин и характера механизма отказов, а также сложное взаимодействие элементов, составляющих систему «внешние факторы — электронные приборы», требуют для своего анализа сочетания различных методов.

Помимо эффективного планирования, системный подход дает возможность рационально применять при проведении различных этапов анализа комплекс статистических, химических, физических и других методов, в том числе методов неразрушающего контроля. В частности, обеспечивается рациональное применение на всех этапах анализа методов технической диагностики отказов и статистических методов оценки результатов исследований.

Таким образом, применение системного подхода дает возможность проводить комплексный анализ получаемой информации, что является одной из основных предпосылок эффективного выполнения целей исследований.

Следует отметить, что методология комплексного анализа, изложенная выше, применима не только для анализа результатов натурных испытаний, но, за небольшим исключением, может быть использована при анализе априорной информации, получаемой в результате неспланированных экспериментов и исследований.

6.2. Комплексный анализ экспериментальных данных, полученных в одном условии испытаний

Подлежащие анализу экспериментальные данные, полученные в каждом условии или режиме натурных испытаний, представляют собой обработанные результаты внешних осмотров и измерений параметров элек-

тронных приборов и внешних факторов, а также сведения о количестве отказов. Анализ различных по своей природе экспериментальных данных должен проводиться комплексно, с тем чтобы обеспечить всестороннюю и целенаправленную оценку результатов испытаний. Реализацией системного подхода в данном случае является комплексное применение различных методов и рациональная последовательность проведения анализа для оперативного получения и использования необходимой информации. Наиболее целесообразным является разделение алгоритма анализа экспериментальных данных, полученных в одном условии испытаний, на два последовательных этапа: 1) анализ изменения параметров и оценка климатической стойкости, долговечности и сохраняемости электронных приборов; 2) анализ и классификация причин и характера отказов. После каждого этапа должна проводиться комплексная разработка выводов и рекомендаций.

Анализ изменения параметров и количества отказов электронных приборов с целью получения данных о их долговечности, сохраняемости и климатической стойкости состоит прежде всего в вычислении основных показателей надежности по известным формулам [26] и сравнении экспериментальных данных с установленными НТД критериями и нормами. Это является основой для определения фактических показателей надежности, разработки справочных данных и мероприятий по повышению стойкости, а также для уточнения требований к электронным приборам.

Таким образом, полученные на первом этапе анализа результаты могут быть оперативно использованы промышленностью и потребителем.

При анализе и определении основных показателей надежности учитываются полные и устойчивые параметрические отказы, а также изменения внешнего вида и коррозионные поражения сверх установленных норм. В то же время при анализе изменений параметров электронных приборов ввиду высокой надежности большинства их классов для сокращения сроков определения влияния климатических факторов в исследовательских целях можно устанавливать нормы более жесткие, чем в НТД. Кроме того, для оперативного получения данных о зависимости параметров и свойств приборов от внешних факторов (даже при отсутствии отказов) необ-

ходимо проводить анализ приборов физико-техническими методами неразрушающего контроля.

Систематическое применение методов интегральной и локальной диагностики в сочетании с измерениями параметров и внешними осмотрами приборов дает возможность определить внутреннее состояние еще не отказавшего изделия, которое невозможно выявить с помощью измерения его параметров. Это очень важно для последующего анализа механизма воздействия факторов окружающей среды на электронные приборы.

Ввиду длительности натурных испытаний высоконадежных электронных приборов применение физико-технических методов неразрушающего контроля или физической диагностики весьма целесообразно, так как позволяет оперативно принимать решения и проводить необходимые дополнительные, в том числе лабораторные, исследования, не дожидаясь наступления отказов в изделиях. Кроме того, это сокращает объем и стоимость испытаний, так как во многих случаях позволяет не проводить натурные испытания образцов, предназначенных для промежуточных исследований разрушающими методами.

Важную роль при проведении анализа изменения параметров электронных приборов играет определение параметров, подвергающихся наиболее существенному изменению. В результате могут быть получены данные, необходимые для уточнения параметров-критериев годности изделий и для определения связи между изменением параметров и климатическими факторами, воздействующими на электронные приборы.

Разнообразие причин и характера отказов требует при анализе целенаправленных действий, так как этот анализ должен давать необходимую информацию для разработки рекомендаций по устранению отказов и повышению климатической стойкости, долговечности и сохраняемости электронных приборов. Кроме того, этот анализ необходим для дальнейших исследований по выявлению механизма процессов, протекающих в электронных приборах под воздействием внешних факторов.

Поэтому при проведении натурных испытаний важную роль играет наиболее информативный путь опреде-

ления причин, видов и характера отказов, обеспечивающий их всесторонний анализ и классификацию.

В работах, проведенных в последнее время [16, 21, 28], разработаны и развиты основные положения, определяющие системный подход к применению различных методов технической диагностики и физико-технических методов неразрушающего контроля к анализу отказов.

Разработанные в настоящее время [28] схемы проведения анализа отказов некоторых классов электронных приборов (приборов с газовым наполнением, полупроводниковых приборов, приборов с термокатодом) могут с успехом применяться при анализе причин и характера отказов при натурных испытаниях. Основной особенностью указанных схем является рациональная последовательность применения различных методов анализа и осмотра изделий. Вначале применяются более простые методы анализа, а также неразрушающие методы контроля (рентгенотелевизионный, электроконтактный, проверка герметичности, люминесцентный и спектральный анализ и др). В случае необходимости осуществляется проверка изделий методами интегральной и локальной диагностики. Далее анализ становится более детальным и применяются более сложные методы и средства. Если установить причину и характер отказов или коррозионных поражений не удается, схемы предусматривают переход к разрушающим методам и химическому анализу.

При проведении натурных испытаний на основе общих принципов построения схем анализа отказов основных классов электронных приборов необходимо разрабатывать схемы с учетом физических и конструктивных особенностей исследуемых приборов и характера процессов, протекающих в них.

Системная последовательность поиска причин отказов дает возможность применять новейшие методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики в сочетании с разрушающими методами исследований структуры и поверхности материалов и элементов электронных приборов (ИК микроскопия, масс-спектроскопия, методы фотоответа, методы точечно-проекционной микрорентгенографии и др.) для всестороннего и тщательного обследования отказавших или потерявших товарный вид электронных приборов, снятых с испытаний.

На основании анализа результатов натурных испытаний и применения описанных выше системы и методов исследований обнаруженные отказы необходимо классифицировать по характеру их проявления и причинам возникновения.

По характеру проявления отказы рекомендуется классифицировать:

а) по степени влияния на работоспособность — на отказы полные и параметрические;

б) по характеру проявления во времени — на отказы постепенные и внезапные.

За полный отказ принимаются нарушения электрических контактов, механической или электрической прочности, приводящие к полной потере работоспособности приборов(обрыв электропроводов, короткое замыкание, пробой диэлектрика, потеря вакуума и т. д.).

За параметрический отказ принимается отклонение параметров приборов, превышающее нормы, установленные для данной категории испытаний.

При анализе результатов натурных испытаний следует различать два вида параметрических отказов:

а) устойчивые;

б) перемежающиеся (возникающие за счет сезонных и погодных изменений климатических факторов).

По причинам возникновения отказы целесообразно классифицировать:

а) по условиям возникновения — на конструкционные, технологические и на эксплуатационные отказы;

б) по типу воздействия — на отказы, вызванные воздействием климатических факторов во времени, и отказы, вызванные воздействием эксплуатационных факторов во времени.

Результаты системного анализа и классификации причин и характера отказов служат основанием для проведения конструктивных и технологических усовершенствований электронных приборов, замены наиболее ненадежных узлов и являются основой для поиска новых методов защиты от внешних воздействий, новых материалов и покрытий. Кроме того, исследования и классификация вида, причин и характера отказов дает необходимую информацию для проведения следующих этапов комплексного анализа, направленного на изучение механизма процессов в электронных приборах, и для работ по определению объективных критериев оцен-

ки их стойкости в естественных и искусственных климатических условиях.

Таким образом, комплексный анализ экспериментальных данных, полученных в одном условии испытаний, обеспечивает выполнение нескольких основных целей исследований, а также создает базу для проведения сравнительного анализа и оценки результатов натурных испытаний в различных климатических условиях.

6.3. Сравнительная оценка результатов испытаний в различных климатических условиях статистическими методами

Сравнение результатов испытаний в различных условиях статистическими методами проводится с помощью проверки гипотез о тождественности распределений случайных величин в двух различных выборках. В ходе сравнения результаты испытаний (например, измерений контролируемых параметров или количество отказов изделий), полученные в двух различных условиях или режимах, оцениваются на основании некоторых статистических критериев. К таким критериям относятся критерии Фишера, Бартлетта, t-критерий Стьюдента, позволяющие сравнивать средние значения либо дисперсии рассматриваемых параметров распределений в различных условиях испытаний. Основополагающим предположением для применения этих критериев является предположение о нормальном распределении значений случайных величин в каждом условии испытаний [29]. Для многих экспериментов это предположение весьма обоснованно.

Однако критерий Фишера и особенно критерий Бартлетта для сравнения дисперсий чувствительны к отклонениям от нормального закона. Если предположение о нормальном распределении не выполняется или неизвестен закон распределения, эти критерии должны быть видоизменены или следует использовать другие критерии, включающие ранговую корреляцию и проверку знаков, которые не требуют таких предположений и называются непараметрическими или критериями с произвольным распределением. Такими крите-

риями являются критерий знаков для разности медиан в парных наблюдениях, критерий Манна—Уитни (предложенный Вилкоксоном), непараметрический критерий Сиджела—Тьюки для сравнения дисперсий и др. [29].

Критерием для определения количественных соотношений между результатами испытаний в различных условиях является коэффициент жесткости воздействия внешних факторов, несущий информацию о степени влияния условий испытаний (климатических факторов, электрических нагрузок и т. д.) на параметры и свойства электронных приборов. Этот коэффициент в данном случае оценивает, во сколько раз результирующее влияние внешних факторов на параметры и свойства изделий в одном условии испытаний больше (или меньше) результирующего влияния факторов в другом условии испытаний, принятом за опорное.

Например, с помощью коэффициента жесткости воздействия можно оценить, насколько существенно изменяются параметры изделий в натурных условиях различных климатических зон по сравнению с изменением параметров таких же изделий при испытаниях в нормальных условиях (в частности, при испытаниях на естественное старение в кондиционируемом помещении), принятых за опорные.

С помощью коэффициента жесткости воздействия можно также определить степень воздействия отдельных климатических факторов при лабораторных испытаниях для выявления основных факторов, вызывающих в изделиях процессы деградации. В этом случае за опорные условия испытаний может быть принят любой режим климатических испытаний, например режим испытаний на теплоустойчивость. Применение перечисленных критериев должно учитывать объем имеющейся для анализа информации. Опыт проведения натурных испытаний показывает, что в большинстве случаев вид функции изменения параметров и свойств изделий от внешних факторов и времени неизвестен. Кроме того, ввиду испытаний малых выборок и наличия малого количества отказов часто не удается определить закон распределения результатов наблюдений.

Поэтому для сравнительной оценки результатов натурных испытаний электронных приборов в различных климатических условиях предложен метод сравнения линий регрессии и выявления их тождественности или

существенного различия с помощью непараметрического критерия Вилкоксона [25].

Метод заключается в сравнении построенных на стадии обработки данных линий регрессии, характеризующих изменение параметров или свойств изделий во времени в одном условии испытаний, с линиями регрессии, характеризующими изменение тех же параметров и свойств аналогичных изделий в другом условии, по временным сечениям. При этом возникает необходимость сравнения законов распределения в каждом сечении. Однако использование непараметрического критерия однородности двух выборок Вилкоксона дает возможность, не строя, более того, не зная законов распределения случайных величин, проверять гипотезу о принадлежности (непринадлежности) двух выборок к одной генеральной совокупности с непрерывной функцией распределения, а также оперировать малым количеством данных (объем выборок может быть до 3 шт.). Кроме того, можно сравнивать линии регрессии в каждой точке (временно́м сечении), что приводит к более точным результатам, чем при сравнении линий регрессии «целиком», как это следовало бы делать при проверке гипотезы о тождественности двух линий регрессии.

Порядок применения критерия Вилкоксона следующий. Пусть случайная величина $X^{(1)}$ (например, параметр i-го изделия в первом условии испытаний) в результате n_1 опытов приняла в i-м опыте значение $\{X_i^{(1)}\}$ $(i=\overline{1,n_1})$, а другая случайная величина $X^{(2)}$ в результате n_2 опытов во втором условии испытаний в j-м опыте приняла значение $\{X_j^{(2)}\}$ $(j=\overline{1,\ n_2})$, то при исследовании оказалось, что

$$\overline{X}^{(1)} \neq \overline{X}^{(2)} \text{ или } S^{(1)} \neq S^{(2)} .$$

Возникает вопрос, являются ли эти расхождения существенными. Иначе говоря, задача состоит в проверке гипотезы об однородности двух выборок, т. е. в проверке того, что функции распределения $P_X^{(1)}(t)$ и $P_X^{(2)}(t)$ — тождественны либо

$$P_X^{(1)}(t) < P_X^{(2)}(t).$$

При такой постановке задачи алгоритм вычислений следующий:

— обе выборки располагаются в один вариационный ряд;

— рассчитывается величина

$$W^* = \sum_{i=1}^{n_1} r_i^{(1)},$$

где $r_i^{(1)}$ — номер по порядку, соответствующий i-й составляющей случайного вектора $\{X_i^{(1)}\}$ при $i = \overline{1, n_1}$;

— выбирается уровень значимости α;

— по значениям n_1, n_2 и α из таблиц, приведенных, например, в [37], находят значения $\underline{W}$ и $\overline{W}$.

Если $W^* \in (\underline{W}, \overline{W})$, то гипотеза о тождественности функций распределения не отвергается.

Когда значения $\underline{W}$ и $\overline{W}$ не табулированы, можно поступить следующим образом: исходя из того, что величина W^* распределена приблизительно нормально с характеристиками

$$m[W^*] = \frac{n_1(n_1 + n_2 + 1)}{2}$$

и

$$S[W^*] = \frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12},$$

значения верхней и нижней границ могут быть рассчитаны по формулам:

$$m \pm t_\beta \sqrt{S}.$$

Значения t_β для различных доверительных вероятностей β приведены в табл. 5.1.

Если при проведении сравнения линий регрессии описанным выше способом установлена тождественность распределений значений параметров в различных условиях испытаний и в различных временных сечениях, количественные соотношения между изменениями параметров или свойств изделий в этих условиях испытаний определяются в форме коэффициента жесткости воздействия вида

$$K_в = t_1/t_2,$$

где t_1 — время, по истечении которого в каком-либо условии испытаний произошло определенное изменение параметра изделия; t_2 — время, по истечении которого то же изменение наблюдается на таком же изделии в другом условии испытаний.

Следует отметить, что в некоторых случаях, например когда в одном из сравниваемых условий испытаний изменение параметров происходит значительно медленнее, чем в другом, использование коэффициента жесткости в виде, показанном выше, неудобно. Тогда целесообразно проводить сравнение линий регрессии за одно и то же время испытаний и определять количественные соотношения между ними с помощью коэффициента вида

$$K_{в1} = \Delta X_1 / \Delta X_2,$$

где ΔX_1 — изменение в изделии, вызванное внешними факторами в каком-либо условии испытаний за время t; ΔX_2 — изменение в таком изделии, вызванное внешними факторами в другом условии испытаний за то же время.

Для определения коэффициента жесткости воздействия вида $K_{в1}$ производят следующие операции:

1) по выборке, характеризующей изменение исследуемого параметра (свойства) изделий или количества отказов, для j-го условия испытаний (для заданного момента времени) рассчитывают величины

$$\overline{X}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}}{n_j};$$

$$S_j = S_{X_j} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\overline{X}_j - X_{ij})^2}{n_j - 1},$$

где n_j — количество изделий в j-й выборке; X_{ij} — значение исследуемого параметра i-го изделия в j-й выборке;

2) коэффициент $K_{в1}$ определяют по формуле

$$K_{в1} = \Delta X_1 / \Delta X_2 = \overline{X}_1 / \overline{X}_2;$$

3) по заданной доверительной вероятности β рассчитывают доверительный интервал для коэффициента $K_{в1}$

по формуле

$$J_\beta = \frac{\overline{X}_1}{\overline{X}_2} \times$$

$$\times \left[\frac{1 \pm t_\beta \sqrt{\frac{S_1}{n_1 \overline{X}_1^2} + \frac{S_2}{n_2 \overline{X}_2^2} - t^2_\beta \frac{S_1 S_2}{n_1 n_2 \overline{X}_1^2 \overline{X}_2^2}}}{1 - t^2_\beta (S^2/n_2 \overline{X}_2^2)} \right]$$

(значения t_β для различных β находят из табл. 5.1).

Как было указано выше, при определении коэффициента жесткости воздействия климатических факторов в любом его виде ($K_в$ или $K_{в1}$) необходимо одно из сравниваемых условий испытаний принимать за опорное.

Описанный метод сравнительной оценки результатов испытаний может использоваться как для сравнения изменения параметров изделий, так и для сравнения количества постепенных отказов. При появлении внезапных отказов данный метод применим, если сравнивать количественные показатели надежности, например, вероятность безотказной работы или хранения по внезапным отказам, используя их как параметр изделий.

Как правило, при проведении натурных испытаний ввиду высокой надежности электронных приборов количество отказов невелико по сравнению с общим количеством испытываемых изделий. Однако применение описанного метода дает возможность количественно оценить различие в условиях испытаний даже при наличии 3—5 отказов в каждом из них.

Таким образом, можно проводить сравнительную оценку результатов испытаний в различных условиях и определять количественные соотношения между ними, оперируя малыми выборками как при наличии, так и при отсутствии отказов, что значительно сокращает объем и стоимость испытаний и обработки их результатов.

6.4. Комплексный сравнительный анализ результатов испытаний в различных климатических условиях

Наиболее важной и сложной задачей при анализе результатов натурных испытаний является изучение характера и механизма процессов, протекающих в электронных приборах при воздействии климатических и экс-

плуатационных факторов, т. е. определение связи между изменяющимися условиями окружающей среды и изменением параметров и свойств изделий. Эта задача может быть решена только с помощью комплексного сравнительного анализа результатов испытаний в различных климатических условиях.

Комплексный анализ включает в себя сравнительный анализ длительности и интенсивности действия климатических факторов и эксплуатационных нагрузок, сравнительный анализ причин и характера отказов, изменений внешнего вида и параметров электронных приборов во всех условиях и режимах испытаний, а также совместную оценку полученных результатов. Исходной информацией для проведения сравнительного анализа служат результаты натурных испытаний в различных климатических зонах с одинаковой продолжительностью (например, в 3 года).

Наиболее целесообразным является выполнение комплексного сравнительного анализа по алгоритму, включающему три этапа:

1) сравнительный анализ климатических условий испытаний;

2) совместный сравнительный анализ климатических условий и результатов испытаний;

3) анализ и исследование характера физико-химических процессов, протекающих в изделиях при воздействии факторов окружающей среды.

Сравнительный анализ климатических условий испытаний производят, сопоставляя определенные экспериментально длительности и интенсивности воздействий климатических факторов в различных условиях и режимах испытаний. Рассматривают факторы и их сочетания, которые, как предполагается, оказывают существенное влияние на процессы, вызывающие изменения параметров и свойств испытываемых электронных приборов.

В результате сравнительного анализа устанавливают степень жесткости условий и режимов испытаний в соответствии со значениями интенсивности и длительности воздействия отдельных факторов и их сочетаний. В частности, климатические условия испытаний могут быть классифицированы по: степени жесткости значений факторов, определяющих коррозионную агрессивность атмосферы; интенсивности и длительности изменений

температуры; длительности высоких значений температурно-влажностного комплекса; значениям и длительностям повышенных температур и т. д.

При сравнительном анализе необходимо использовать априорную информацию о связи климатических факторов с основными процессами, протекающими в электронных приборах. Классификация климатических условий по характеру воздействия на них основных климатических факторов дает возможность предположить, насколько интенсивно будут протекать в испытуемых изделиях физико-химические процессы, вызываемые этими факторами. Так, из сравнения нескольких зон по климатическим условиям можно предположить, что процессы теплового старения будут быстрее развиваться в зоне с наиболее высокими и длительно действующими температурами, а процессы коррозии — в зоне с наибольшими значениями факторов, определяющих коррозионную агрессивность атмосферы.

Таким образом, сравнительный анализ климатических условий натурных испытаний, сочетающих изучение эмпирических данных и результатов теоретических исследований, создает необходимую базу для проведения следующих этапов исследований, которые должны уточнить сделанные предположения о характере влияния факторов на основные процессы, протекающие в электронных приборах. На втором этапе комплексного анализа сопоставляют результаты, полученные на первом этапе и при сравнительном анализе статистическими методами.

В результате совместного сравнительного анализа степени жесткости климатических условий и статистического различия результатов испытаний появляется возможность установить связь между климатическими факторами, характеризующими эти условия испытаний, и изменением параметров или количеством отказов приборов.

Таким образом, для рассматриваемого прибора можно установить основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на те или иные его параметры и свойства. Например, если при сравнении результатов испытаний в нескольких климатических зонах установлено, что величина необратимого уменьшения сопротивления изоляции изделия возрастает от зоны к зоне в той же последовательности, в какой возрастают значения температур-

но-влажностного комплекса в этих зонах, можно считать, что именно этот комплекс, а не другие внешние факторы (колебания температуры, высокая влажность при нормальных температурах, высокая температура и др.) является основным фактором, вызывающим наибольшее ухудшение рассматриваемого параметра.

Пользуясь аналогичными рассуждениями, можно установить связь между основными факторами и характером отказов или коррозионных поражений электронных приборов. Для этого необходимо результаты сравнительного анализа климатических условий испытаний сопоставить с результатами анализа характера отказов и коррозионных поражений исследуемых приборов.

Например, производя сравнение результатов внешнего осмотра приборов в климатической зоне, имеющей повышенную температуру, повышенную влажность и чистую атмосферу, и в зоне с более низкой температурой, повышенной влажностью, но с большим содержанием хлоридов в воздухе, можно установить, что на интенсивность коррозионных поражений данного прибора большее влияние оказывают факторы второй зоны, которые можно считать основными.

Следует отметить, что часто из-за сложности электронных приборов и совместного воздействия в естественных условиях многих факторов окружающей среды на основании только натурных испытаний выявить влияние отдельных факторов на параметры и отказы не представляется возможным. В этих случаях необходимо использовать априорную информацию (результаты конструктивных, типовых или периодических лабораторных испытаний приборов, аналогичных исследуемым, результаты эксплуатации, литературные данные и т. д.) для дополнения результатов натурных испытаний.

Сравнение результатов лабораторных испытаний и исследований, проводимых при фиксированных значениях факторов, описанными выше статистическими методами может дать необходимую информацию об основных факторах, вызывающих деградацию параметров и отказы исследуемых приборов.

При отсутствии или недостаточном объеме априорной информации, необходимой для определения основных факторов, следует провести серию кратковременных лабораторных испытаний при нескольких различных, наиболее часто встречающихся при натурных испыта-

ниях воздействующих факторах и осуществить статистическую оценку и комплексный анализ их результатов. Длительность этих испытаний должна быть одинаковой и достаточной для выявления влияния климатических факторов на процессы, вызывающие изменения параметров и внешнего вида исследуемых приборов.

Указанные дополнительные лабораторные испытания дают возможность однозначно и качественно и количественно оценить влияние основных факторов, воздействующих на данные изделия.

После того, как установлены основные климатические факторы и определено их влияние на параметры и свойства электронных приборов, необходимо перейти к заключительной фазе сравнительного анализа — исследованию механизма и характера физико-химических процессов, протекающих в приборах. Как правило, под воздействием внешних факторов в материалах и приборах может происходить одновременно несколько физико-химических процессов, однако только основные, определяющие процессы вызывают наиболее сильное изменение внутренних свойств и связанных с ними параметров.

Для упрощения современные исследователи полагают, что существенное изменение свойств, приводящее к отказам изделий, как правило, вызвано одним основным процессом. При изучении физико-химических процессов, протекающих во времени, считают, что основным процессом является процесс с минимальной энергией активации; это облегчает задачу его выявления и исследования [1].

Следует, однако, отметить, что один и тот же процесс может вызвать изменение различных свойств материалов изделий и тем самым изменить различные выходные параметры. Поэтому, как было указано в гл. 2, необходимо рассматривать воздействие факторов окружающей среды на электронные приборы с позиций системного подхода, т. е. анализ механизма и характера процессов изменения свойств и параметров проводить на основе совместного изучения всех составляющих элементов системы «внешние факторы — электронные приборы».

Результаты натурных испытаний дают возможность выполнять более детальный анализ, чем анализ, предусматриваемый схемой, описанной в гл. 2, так как в итоге экспериментальных и теоретических исследований и

анализа априорной информации имеются данные анализа причин и характера отказов, причин изменения параметров (при отсутствии отказов), данные внешних осмотров приборов, а также данные анализа по определению основных воздействующих факторов и их взаимодействия с основными физико-химическими процессами.

Следовательно, анализ влияния факторов окружающей среды на электронные приборы, устанавливающий причинную, физическую связь между изменением пара-

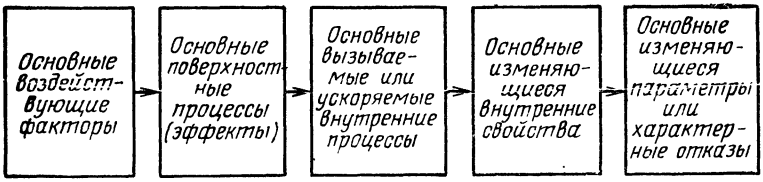


Рис. 15. Логическая схема анализа механизма процессов в электронных приборах при воздействии климатических факторов.

метров (отказами) изделий и воздействующими факторами может проводиться по логической схеме (рис. 15).

Проведение анализа по этой схеме позволяет рассматривать основные поверхностные и внутренние процессы, происходящие в электронных приборах, в неразрывной связи с вызывающими эти процессы факторами и с изменяющимися свойствами, параметрами и отказами. Комплексный анализ результатов натурных испытаний, проводимый в соответствии с этой схемой, дает возможность конкретизировать для исследуемых типов изделий общую предварительную модель воздействия климатических факторов окружающей среды на электронные приборы, описанную в гл. 2.

Таким образом, для каждого конкретного типа электронных приборов на основании результатов натурных испытаний и анализа априорной информации может быть разработана физическая модель, с помощью которой должны проводиться дальнейшие исследования. Например, на основе физической модели и анализа механизма процессов в изделиях можно построить математические модели изменения параметров и свойств изделий при воздействии факторов окружающей среды.

Кроме того, могут быть получены данные для определения научно обоснованных критериев, необходимых для сравнительной оценки влияния условий окружающей среды на электронные приборы. Эти критерии, основанные на знании механизма процессов в электронных приборах и устанавливающие определенные значения интенсивности и длительности воздействия основных климатических факторов, вызывающих эти процессы, могут в дальнейшем, по мере накопления экспериментальных данных, применяться для климатического районирования.

7. Интерпретация экспериментальных данных с помощью физико-математических моделей

7.1. Выбор эффективных методов построения и анализа моделей

Одной из основных задач натурных испытаний является выявление функциональной связи между изменениями свойств электронных приборов и внешними факторами, воздействующими на них в естественных условиях окружающей среды. Комплексный анализ результатов натурных испытаний в различных условиях методами, описанными выше, дает возможность определить влияние воздействующих факторов на механизм и характер процессов изменения свойств электронных приборов и выявить основные факторы, вызывающие наиболее существенные изменения, т. е. получить необходимую информацию для построения моделей, с достаточной полнотой описывающих эти процессы.

При анализе результатов натурных испытаний важнейшие переменные, характеризующие процесс, известны и требуется построить математическую модель, которая в данном случае может быть отнесена к эмпирическому типу модели [29].

Ввиду того, что подлежащие анализу и обработке данные являются чаще всего случайными величинами, отражающими физическую сущность процессов изменения свойств испытываемых приборов, необходимо ис-

пользовать для построения и анализа моделей статистические методы в сочетании с методами изучения физико-химических процессов.

Следует находить подходящую модель, затрачивая, по возможности, минимальные усилия и получая максимум полезной информации, т. е. выбирать рациональную стратегию организации и проведения работ. Как на предыдущих этапах исследований, наиболее эффективным является системный подход к построению и анализу моделей, заключающийся в использовании комплекса нескольких взаимосвязанных методов вычислений и анализа, а также в последовательном планировании и проведении основных операций и процедур.

Опыт показал, что наиболее целесообразно применять в совокупности со статистическими методами, используемыми для нахождения оценок и анализа параметров моделей, методы теории подобия для определения применимости этих моделей при опасании исследуемых процессов. Комплексное использование этих методов дает возможность разрабатывать модели, отражающие физико-химические процессы в электронных приборах, вызванные воздействием факторов окружающей среды.

Последовательное планирование предусматривает разделение всего процесса построения и анализа моделей на несколько последовательных этапов, в каждом из которых осуществляется некоторый цикл операций и процедур. Каждый этап содержит: выбор исходной формы математической модели, в которой изменение параметров или свойств электронных приборов выражается в виде функции независимых переменных (воздействующих факторов); вычисление коэффициентов модели на основе результатов испытаний и исследований; методами корреляционно-регрессионного анализа; оценку и анализ полученных зависимостей методами дисперсионного анализа, а также анализ применимости полученных моделей для описания исследуемых процессов методами теории подобия. В результате может выявиться необходимость в построении некоторой новой уточненной модели, более полно описывающей исследуемый процесс. В этом случае цикл после предварительного планирования повторяется. Как правило, на каждом последующем этапе построения и анализа моделей по спирали возрастают сложность и объем вычислений и анализа, а также объем используемой информации, что

дает возможность последовательно приближаться к более точным решениям.

Циклическое планирование процедур по построению и анализу моделей, а также применение в каждом цикле комплекса статистических и физических методов дает возможность в ходе каждого цикла строить и оценивать физико-математические модели наиболее эффективными методами.

Таким образом, правильно спланированный поиск наилучшей модели из ряда возможных и выбор способов эффективной оценки параметров выбранной модели помогает сэкономить время, сократить объем работ и принимать в ходе вычислений обоснованные решения об их направленности, дальнейшем расширении или прекращении, а также о необходимости привлечения дополнительной информации для более полного описания изучаемых процессов.

На основании соображений, приведенных выше, далее описывается разработанный нами комплексный метод построения и анализа физико-математических моделей, который, как показал опыт, в некоторых случаях может непосредственно применяться в практической работе по анализу зависимостей, наиболее часто встречающихся при натурных и климатических лабораторных испытаниях [38].

При изложении метода в качестве иллюстрации используются наиболее простые функциональные зависимости, что не исключает применение основных его принципов при построении более сложных и точных моделей.

7.2. Комплексный метод построения и анализа физико-математических моделей по результатам натурных испытаний

Опыт показал, что в большинстве случаев построение и анализ моделей, с достаточной для инженерной практики точностью описывающих изучаемые процессы изменения свойств и параметров приборов, может проводиться в два этапа.

Основной целью первого этапа построения модели является определение и анализ зависимостей исследуемых характеристик приборов от времени. В качестве

исходных данных могут использоваться результаты обработки и анализа исследуемых характеристик в каждом условии испытаний методами, изложенными в гл. 5 и 6.

Наибольшую трудность при построении моделей представляет выбор исходной ее формы. Однако, как показал анализ результатов натурных испытаний, функциональная связь изменений параметров и свойств испытываемых электронных приборов с изменяющимися факторами окружающей среды во многих случаях может быть описана линейной моделью либо моделью, которая с помощью несложных преобразований может быть приведена к линейной форме. Поэтому в большинстве случаев аппроксимацию результатов натурных испытаний целесообразно проводить линейными моделями, а нахождение оценок параметров этих моделей — методами корреляционно-регрессионного анализа.

Ввиду того, что при проведении натурных испытаний необходимо испытывать выборки возможно меньшего объема, наиболее простым и приемлемым методом, позволяющим находить оценки параметров моделей как в случае больших, так и в случае малых выборок, является метод наименьших квадратов. Он основан на минимизации суммы квадратов отклонений наблюдаемых значений от их математических ожиданий. Задача состоит в нахождении оценок параметров A, B модели вида

$$X = f(A, B, \ldots, t),$$

где X — зависимая переменная (например, параметр, свойство, количество отказов приборов); A, B — независимые переменные, отражающие влияние внешних факторов на величину зависимой переменной; t — время испытаний.

Алгоритмы нахождения оценок параметров математических моделей методом наименьших квадратов в настоящее время подробно разработаны и описаны в литературе, в частности в [29, 30], и поэтому здесь не приводятся.

Анализ полученных математических моделей и их параметров состоит в оценке соответствия моделей экспериментальным данным и в оценке значимости параметров (коэффициентов) модели методами дисперсионного анализа, которые в большинстве случаев дают возможность установить с определенной доверительной

вероятностью, что полученная модель не противоречит опытным данным. Кроме того, эти методы позволяют исключить из рассмотрения факторы, оказывающие пренебрежимо малое влияние на рассматриваемые свойства приборов [29].

Полученные описанными выше методами функциональные зависимости изменения свойств и параметров электронных приборов от времени характеризуют некоторые процессы, вызывающие эти изменения. Поэтому после построения математической модели и анализа ее параметров и свойств необходимо провести анализ и сравнительную оценку полученных в различных условиях испытаний функциональных зависимостей, с тем чтобы определить, какие из них подобны друг другу. Опыт показал, что наиболее рациональными методами проведения анализа уравнений являются методы теории подобия.

На стадии анализа уравнений достаточно выявить так называемое функциональное подобие явлений, описываемых этими уравнениями, не вскрывая внутренние физические причины и структуру физико-химических процессов, протекающих в приборах при воздействии внешних факторов. Для проверки функционального, в частности математического, подобия достаточно установить, что сравниваемые зависимости имеют одинаковую форму и их соответствующие параметры связаны определенными соотношениями [32].

В соответствии с третьей теоремой подобия подобными являются те процессы или явления, у которых условия однозначности подобны и определяющие критерии равны [33].

При планировании и проведении натурных испытаний должно быть обеспечено подобие условий однозначности, т. е. в различных условиях испытываются выборки тождественных (подобных) изделий одной партии, одного завода-изготовителя (начальные условия подобны); условия испытаний (граничные условия), за исключением климатических, подобны и т. д. [19].

Поэтому на первом этапе построения модели необходимо установить только равенство определяющих критериев подобия для зависимостей изменения исследуемых параметров от времени в различных условиях испытаний. Определяющие критерии подобия должны быть составлены из величин, характеризующих данный

случайный процесс. Например, для линейной зависимости вида $X=At$ критерий подобия может быть выражен безразмерным соотношением

$$K=X/At. \qquad (1)$$

Тогда условие подобия для двух случайных процессов, описываемых выражениями $X_1=A_1t_1$; $X_2=A_2t_2$, может быть представлено в виде

$$X_1/A_1t_1=X_2/A_2t_2=\text{idem}. \qquad (2)$$

Следовательно, если значения параметров функциональных зависимостей, полученных в двух или нескольких условиях испытаний, обеспечивают выполнение равенства (2), можно считать, что эти зависимости подобны, т. е. что процессы, протекающие в электронных приборах в сравниваемых условиях, имеют подобные проявления. Это еще не свидетельствует о физическом подобии самих процессов, но дает возможность сократить объем вычислений и анализа, так как при дальнейшем построении обобщенных моделей целесообразно ограничиться рассмотрением зависимостей, отвечающих условиям математического подобия.

Применение теории подобия дает возможность представить количественные соотношения между результатами испытаний в различных условиях в виде коэффициентов, составленных из постоянных величин, так называемых «констант подобия».

Согласно теории подобия, если два процесса подобны, то все сходственные величины, характеризующие процесс, пропорциональны друг другу, причем для разных величин коэффициенты пропорциональности (константы подобия) могут быть различными, являясь постоянными для двух сходственных величин [33].

В соответствии с приведенной формулировкой, например в случае подобия линейных зависимостей, величины, входящие в определяющие критерии (1), могут быть представлены в виде следующих соотношений:

$$X_2=C_XX_1; \quad A_2=C_aA_1; \quad t_2=C_tt_1,$$

где C_a, C_X и C_t — константы подобия. Отсюда условие подобия (2) может быть представлено в виде

$$C_X/C_aC_t=1. \qquad (3)$$

Из соотношения (3) вытекает, например, что при равенстве значений или изменений параметров X в двух условиях испытаний, т. е. при $C_X=1$, и если процессы изменения параметров в этих условиях испытаний подобны, должно выполняться равенство $C_aC_t=1$, откуда коэффициент жесткости воздействия внешних факторов, представляющий собой соотношение времен достижения одного и того же значения параметра в двух различных условиях испытаний [25], определяется из соотношения

$$K_в=t_1/t_2=A_2/A_1.$$

При этом

$$C_t=1/C_a.$$

Аналогично при $t_1=t_2$ ($C_t=1$) должно быть справедливо равенство $C_X=C_a$. Тогда коэффициент жесткости воздействия может быть представлен в виде соотношения значений параметра в двух различных условиях испытаний в одни и те же моменты времени, т. е.

$$K_{вI}=X_1/X_2=A_1/A_2.$$

Определение количественных соотношений между результатами испытаний в различных условиях на стадии анализа уравнений с помощью соотношения (3) и коэффициентов жесткости воздействия вида $K_в$ и $K_{вI}$ дает возможность установить степень влияния факторов, характерных для этих условий испытаний, на процессы изменения параметров электронных приборов. Это, в свою очередь, позволяет определить применимость предварительной модели для описания исследуемых процессов.

Если установлено, что внешние факторы в различных условиях испытаний (например, в различных климатических зонах) не оказывают существенного влияния на зависимости изменения исследуемых параметров от времени, т. е. если

$$C_X/C_aC_t=1 \text{ и } C_t=C_X=1,$$

то предварительная модель, построенная на первом этапе и описывающая зависимость параметров от времени, является окончательной для рассматриваемых типов электронных приборов. Эта модель, очевидно, описывает процесс деградации параметров электронных прибо-

ров, вызванный процессом естественного старения. Тогда, используя полученную модель, можно проводить так называемое статистическое прогнозирование изменения параметров, свойств или основных показателей надежности (сохраняемости) электронных приборов на необходимый срок, превышающий прошедшее время испытаний [31].

Например, при линейной зависимости модель, пригодная для статистического прогнозирования, имеет вид

$$X = At + B.$$

Если с помощью сравнительного анализа предварительных моделей установлено существенное влияние факторов окружающей среды, воздействующих в различных условиях испытаний, то необходимо перейти ко второму этапу — построению уточненной модели.

В рамках второго этапа построения моделей выбор исходной ее формы зависит от полноты информации о влиянии отдельных внешних факторов, их сочетаний и интенсивности на процессы, вызывающие изменения свойств и параметров электронных приборов.

Комплексный сравнительный анализ результатов натурных испытаний в различных климатических зонах и условиях и анализ литературных данных, а также анализ, проведенный на предыдущем этапе, должны дать необходимую информацию.

В общем виде математическое выражение влияния климатических и эксплуатационных факторов на параметры или свойства электронных приборов может базироваться на следующих соображениях. При испытаниях приборов в естественных климатических условиях на них комплексно воздействует несколько климатических факторов, интенсивность и длительность действия которых непрерывно меняются. Анализ, проведенный на предыдущих этапах исследований, позволяет выделить основные воздействующие факторы, вызывающие существенное изменение параметров и свойств приборов, и тем самым ограничить число факторов и их сочетаний, подлежащих дальнейшему рассмотрению. Опыт показывает, что основными климатическими факторами, которые следует учитывать при построении моделей, чаще всего являются температура и ее изменение, повышенная влажность в сочетании с повышенной температурой, загрязненность

воздуха коррозионно-агрессивными агентами, электрическая нагрузка и некоторые другие [1—5, 23, 24].

Следовательно, изменение любого параметра, эксплуатационной характеристики или свойства электронного прибора в естественных условиях является сложной функцией одного или нескольких воздействующих факторов и в любой момент может быть описано функциональной зависимостью вида

$$X_1 = f_1(y_{11}, y_{21}, \ldots, y_{m1}).$$

В следующие моменты времени из-за изменчивости воздействия внешних факторов исследуемый параметр может быть выражен функциональными зависимостями вида

$$X_2 = f_2(y_{11}, y_{21}, \ldots, y_{m1}, y_{12}, y_{22}, \ldots, y_{m2});$$

$$\vdots$$

$$X_i = f_i(y_{11}, y_{21}, \ldots, y_{m1}, y_{12}, y_{22}, \ldots, y_{m2}, \ldots,$$
$$y_{1,\,i-1}, y_{2,\,i-1}, \ldots, y_{m,\,i-1}, y_{1i}, y_{2i}, \ldots, y_{mi}) \text{ и т. д.},$$

где X_i — значение параметров в i-й момент времени; y_{ji} — значение j-го воздействующего фактора (температуры, влажности, электрической нагрузки и т. д.) в i-й момент времени.

Таким образом, можно полагать, что значение исследуемого параметра в любой момент времени зависит от значений, принимаемых воздействующими факторами на протяжении всего времени испытаний до этого момента. Однако в естественных условиях изменяются интенсивность и длительность воздействия определенных факторов и на развитие некоторых процессов оказывает влияние их комплексное воздействие. Поэтому весь период воздействия факторов в естественных условиях целесообразно разделить на короткие интервалы (элементарные промежутки времени), в течение которых значения определенных факторов или их сочетания можно считать практически постоянными.

Полагая, что A'_i — скорость изменения исследуемого параметра в элементарный промежуток времени Δt_i постоянна, изменение параметра в этот промежуток времени Δt_i можно представить в виде

$$\Delta X_i = A'_i \Delta t_i. \qquad (4)$$

Полное изменение параметра за время t может быть представлено суммой его элементарных изменений:

$$\Delta X = \sum_i A'_i \Delta t_i = \sum_i \Delta X'_i.$$

В реальных условиях значения климатических факторов изменяются на протяжении всего периода испытаний, поэтому постоянные в отдельные промежутки времени Δt скорости изменения параметра X в общем не равны между собой. Однако значения климатических воздействий имеют определенную повторяемость, поэтому из всего времени испытаний можно выделить отдельные периоды, в течение которых значения воздействующих факторов (или их сочетаний) одинаковы.

Полагая, что скорости изменения параметра X в эти периоды времени одинаковы, полное его изменение за все время t может быть представлено суммой:

$$\Delta X = \sum_{l=1}^{k} A_l \Delta t_l, \qquad (5)$$

где A_l — скорость изменения параметра при воздействии l-го значения воздействующего фактора (или l-го сочетания значений нескольких факторов); Δt_l — продолжительность воздействия l-го значения фактора (или l-го сочетания значений нескольких факторов); k — количество значений, принимаемых воздействующим фактором (или количество различных сочетаний значений нескольких факторов) за все время испытаний.

Таким образом, уравнение (5) дает возможность при оценке изменения параметров, характеристик и свойств электронных приборов учитывать длительность воздействия, тип и интенсивность факторов, действующих раздельно или в сочетаниях друг с другом.

Кроме того, появляется возможность учитывать обратимые явления ухудшения или улучшения характеристик приборов в зависимости от изменяющихся значений климатических факторов.

Скорость изменения параметра является, в свою очередь, функцией воздействующих факторов, физических и физико-химических свойств материалов, конструкции приборов, наличия и качества защитных покрытий и т. д.

и может быть записана в виде

$$A=\varphi(y_1,\ y_2,\ldots,\ y_m,\ a_1,\ a_2,\ldots,\ a_r), \qquad (6)$$

где $y_j(j=\overline{1,\ m})$ — воздействующие факторы; $a_p(p=\overline{1,\ r})$ — постоянные величины, характеризующие основные физико-химические свойства материалов и конструкцию приборов, т. е. внутренние их свойства. К ним относятся, например, частотный фактор коэффициента диффузии, константы скорости химических реакций, энергии активации процессов теплового старения и т. д. [10].

Следовательно, уравнение (5) с учетом уравнения (6) описывает зависимость изменения параметров приборов от их внутренних свойств и внешних воздействующих факторов, а уравнение (6) может быть использовано для построения уточненной модели.

Оценка коэффициентов a_p $(p=\overline{1,\ r})$ и свойств модели (6) может быть произведена методами корреляционно-регрессионного и дисперсионного анализов путем совместной обработки зависимостей, полученных в N различных условиях испытаний (например, в N климатических зонах), причем N должно быть больше r.

Исходной информацией служат значения коэффициентов A, метеорологические и эксплуатационные характеристики, полученные в каждом условии испытаний, а также результаты анализа информации, проведенного на предыдущих стадиях исследований. Особое значение при совместной обработке приобретает установление подобия рассматриваемых процессов. На первом этапе построения моделей достаточным является установление математического подобия между функциональными зависимостями, характеризующими процесс в целом, не выявляя соотношений между текущими параметрами процесса.

Однако на втором этапе, перед совместной обработкой зависимостей, полученных в различных условиях испытаний, необходимо провести более детальное их сравнение, так как совместное рассмотрение процессов, протекающих в различных условиях, имеет физический смысл только при их подобии.

При определении подобия целесообразно сравнивать процессы в двух условиях испытаний в нескольких сходственных точках, например в нескольких временных

сечениях, что дает возможность установить соотношения между текущими параметрами процесса. В этом случае определяется интегральное подобие, которое не только устанавливает аналогичную реакцию прибора на воздействие факторов окружающей среды, но и приближенно свидетельствует о подобии физических и физико-химических внутренних процессов в приборах, обусловливающих изменение их параметров под воздействием внешних факторов.

Следовательно, если в результате анализа и вычислений в нескольких сходственных точках установлено выполнение условий [например, вида (2) или (3)], можно предварительно полагать, что случайные подобные изменения параметров в сравниваемых условиях испытаний вызваны подобными физическими или физико-химическими процессами. Только тогда полученные при совместной обработке коэффициенты будут характеризовать эти физические и физико-химические процессы изменения внутренних свойств приборов.

Установив интегральное подобие процессов и вид зависимостей (6) в каждом условии испытаний, необходимо провести совместную их обработку. Например, при линейной зависимости скорости изменения параметров или свойств A от внешних и внутренних факторов исходная форма модели имеет вид

$$A = a_1 y_1 + a_2 y_2 + \ldots + a_m y_m.$$

Тогда полное изменение параметра X за время t в n-м условии испытаний в соответствии с (2) для данного случая принимает вид

$$X_n = \sum_{l=1}^{k_n} t_{nl} (a_1 y_{1l} + a_2 y_{2l} + \ldots + a_m y_{ml}) =$$

$$= \left[\sum_{l=1}^{k_n} \frac{t_{nl}}{t} (a_1 y_{1l} + a_2 y_{2l} + \ldots + a_m y_{ml}) \right] t =$$

$$= \left[\sum_{l=1}^{k_n} p_{nl} (a_1 y_{1l} + a_2 y_{2l} + \ldots + a_m y_{ml}) \right] t,$$

где $p_{nl}=t_{nl}/t$ — повторяемость l-го значения или сочетания значений факторов в n-м условии испытаний; k_n — количество различных значений или сочетаний значений воздействующих факторов в n-м условии испытаний; t — время испытаний; t_{nl} — суммарное время, в течение которого значения факторов или их сочетания постоянны.

Очевидно, что слагаемые a_1y_{1l}, a_2y_{2l}, ..., a_my_{ml} характеризуют влияние отдельных факторов и вызываемых ими процессов на общую скорость изменения параметров и свойств.

Таким образом, коэффициент A_n может быть представлен в виде

$$A_n=\sum_{l=1}^{k_n} p_{nl}(a_1y_{1l}+a_2y_{2l}+\ldots+a_my_{ml}). \qquad (7)$$

Значения p_{nl}, k_n, t, t_{nl} определяются по результатам натурных испытаний при обработке ежечасных метеоданных [19, 23]. Например, p_{nl} — может быть представлена в виде повторяемости значений температурно-влажностного комплекса по соответствующим градациям.

При выборе времени действия и значений метеорологических факторов для подстановки в формулу (7) необходимо пользоваться данными предварительного анализа влияния указанных факторов на конкретные процессы, вызывающие изменения свойств и параметров исследуемых электронных приборов. Эти данные могут быть получены обобщением результатов натурных и лабораторных климатических испытаний приборов, аналогичных исследуемым по материалам, конструкции и функциональному назначению.

На основе анализа выбираются только те значения и только тех факторов, которые оказывают существенное влияние на процессы, обусловливающие изменение параметров и свойств исследуемых приборов. Так, для оценки необратимого прерывистого процесса коррозии, вызывающей изменение внешнего вида, ухудшение параметров и отказы электронных приборов, следует учитывать из всего объема метеорологических данных только время действия положительных значений температуры, относительной влажности выше 70% и концентраций коррозионно-агрессивного агента, превышающих фоновые (для сернистого газа 0,02 мг/м^3, для хлоридов 0,002 мг/м^3 в год) [23, 24].

Иными словами, значения факторов, время действия которых рассматривается при расчетах по формуле (7), должны превышать критические значения, установленные для вызываемых ими физико-химических процессов.

При совместной обработке зависимостей, полученных в различных условиях испытаний методами корреляционно-регрессионного и дисперсионного анализа, исходные соотношения для оценки коэффициентов обобщенной модели зависят от вида уравнений. Так, при линейной зависимости вида (7) оптимальные оценки коэффициентов a_p $(p=\overline{1, m})$ находятся в результате минимизации функционала

$$S=\sum_{n=1}^{N}\left[A_n-\sum_{l=1}^{k_n} p_{nl}(a_1y_{1l}+a_2y_{2l}+\ldots+a_my_{ml})\right]^2$$

Совокупность коэффициентов a_p $(p=\overline{1, m})$, подлежащих оценке, записывается в виде матрицы

$$A=\begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_m \end{vmatrix}.$$

Элементы указанной матрицы определяются из матричного равенства $BA=Z$, откуда $A=B^{-1}Z$. Элементы матрицы B представляют собой комбинации произведений значений каждого фактора (или совокупности значений факторов) на их повторяемость в каждом условии испытаний, т. е. являются комбинациями величин $p_{nl}y_{fl}$ $(n=\overline{1, N};\ l=\overline{1, k_n};\ f=\overline{1, m})$, а элементы матрицы Z есть комбинации величин $p_{nl}y_{fl}$ и значений коэффициента A, полученных ранее для каждого условия испытаний.

При положительном исходе процедур оценки коэффициентов a_p $(p=\overline{1, m})$, их значимости, а также оценки соответствия экспериментальным данным модели

$$A=\sum_{l=1}^{k} p_l(a_1y_{1l}+a_2y_{2l}+\ldots+a_my_{ml}),$$

изменение во времени исследуемого параметра или свойства электронного прибора с учетом линейной зависимости от значений воздействующих факторов в любом условии испытаний может быть описано уточненной моделью вида

$$X = t \sum_{l=1}^{k} p_l (a_1 y_{1l} + a_2 y_{2l} + \ldots + a_m y_{ml}).$$

На основании вышеизложенного последнее соотношение представляет собой физико-математическую модель.

Таким образом, комплексный метод построения и анализа эмпирических моделей дает возможность получить функциональную зависимость изменения параметров и свойств электронных приборов от воздействия факторов окружающей среды и оценить влияние отдельных факторов и процессов, вызываемых ими, на общий процесс деградации свойств.

Полученные физико-математические модели могут быть использованы для прогнозирования поведения изделий в реальных условиях эксплуатации и хранения, а также для выбора режимов лабораторных климатических испытаний, моделирующих изменение характеристик электронных приборов в натурных условиях.

7.3. Примеры построения некоторых наиболее распространенных моделей

Анализ результатов натурных испытаний показал, что зависимости изменения параметров, свойств или показателей надежности большинства классов электронных приборов от времени чаще всего выражаются в виде линейных или экспоненциальных функций. Так, например, изменение параметров транзисторов, полупроводниковых диодов, резисторов, конденсаторов, микромодулей, гибридных микросхем и рост коррозионных поражений во времени описываются линейными зависимостями. В то же время изменение сопротивления изоляции коммутационно-установочных изделий и трансформаторов и основные показатели надежности, в частности вероятность безотказной работы или безотказного хранения, зависят от времени экспоненциально.

Рассматривая зависимости скорости изменения свойств и параметров большинства электронных приборов от воздействующих факторов, можно убедиться, что, как правило, они также выражаются в виде линейных или экспоненциальных функций. Например, известно, что скорость изменения диэлектрической проницаемости материалов прямо пропорциональна температуре и электрической нагрузке, скорость изменения электропроводности диэлектрика прямо пропорциональна электрической нагрузке и т. д.

Большинство физико-химических процессов, протекающих в электронных приборах, подчиняется закону Аррениуса, например скорость таких процессов, как диффузия, коррозия, рекристаллизация, сорбция и т. д. экспоненциально зависит от внешних факторов [3, 4, 10]. Поэтому целесообразно привести методику построения моделей перечисленных зависимостей с учетом специфики вычислений и оценки их результатов [40].

7.3.1. Построение линейных моделей

Если зависимость электрических параметров, свойств или эксплуатационных характеристик электронных приборов от времени аппроксимируются прямыми вида

$$X = At + B, \tag{8}$$

то с помощью метода наименьших квадратов оценки параметров этих прямых рассчитываются по формулам

$$\hat{A} = \frac{N\sum_{i=1}^{N} \overline{X}_i t_i - \sum_{i=1}^{N} \overline{X}_i \sum_{i=1}^{N} t_i}{N\sum_{i=1}^{N} t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} t_i\right)^2}; \tag{9}$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \overline{X}_i \sum_{i=1}^{N} t_i^2 - \sum_{i=1}^{N} t_i \sum_{i=1}^{N} \overline{X}_i t_i}{N\sum_{i=1}^{N} t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N} t_i\right)^2}, \tag{10}$$

где $\overline{X}_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} X_{ij}$ — среднее значение величины X в момент времени t_i $(i = \overline{1,N})$; X_{ij} — значение исследуемой ве-

личины (электрического параметра, свойства и т. д.) j-го члена выборки при i-м измерении; n — объем выборки (например, количество испытываемых приборов, отказов и т. д.).

Доверительные интервалы для параметров A и B рассчитываются по формулам

$$\hat{A} - t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right),\nu} S_A \leqslant A \leqslant \hat{A} + t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right),\nu} S_A, \tag{11}$$

$$\hat{B} - t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right),\nu} S_B \leqslant B \leqslant \hat{B} + t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right),\nu} S_B, \tag{12}$$

где $t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right),\nu}$ — распределение Стьюдента. Значения t для различных уровней значимости α (либо различных доверительных вероятностей P) приведены в литературе по математической статистике, в частности в [29, 36, 37];

$$S^2_A = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial A}{\partial X}\right)^2_i S^2_{iX}; \tag{13}$$

$$S^2_{iX} = \frac{\sum_{k=1}^{n} (\bar{X}_i - X_{ik})^2}{n-1}; \tag{14}$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial X}\right)_i = \frac{N t_i - \sum_{i=1}^{N} t_i}{N \sum_{i=1}^{N} t^2_i - \left(\sum_{i=1}^{N} t_i\right)^2}; \tag{15}$$

$$S^2_B = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial B}{\partial X}\right)^2_i S^2_{iX}; \tag{16}$$

$$\left(\frac{\partial B}{\partial X}\right)_i = \frac{\sum_{i=1}^{N} t^2_i - t_i \sum_{i=1}^{N} t_i}{N \sum_{i=1}^{N} t^2_i - \left(\sum_{i=1}^{N} t_i\right)^2}. \tag{17}$$

Если зависимости параметров от времени аппроксимируются прямой вида

$$X = At, \tag{18}$$

то оценка параметра A рассчитывается по формуле

$$\hat{A} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \overline{X}_i t_i}{\sum_{i=1}^{N} t^2_i}. \tag{19}$$

Доверительные интервалы для параметра A рассчитываются по формуле (11) с учетом того, что

$$\left(\frac{\partial A}{\partial X}\right)_i = \frac{t_i}{\sum_{i=1}^{N} t^2_i}. \tag{20}$$

Для оценки адекватности моделей вида (8) или (18) опытным данным рассчитываются величины дисперсии воспроизводимости

$$S^2_{\{X\}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{n} (X_{ik} - \overline{X}_i)^2}{N(n-1)} \tag{21}$$

и дисперсии адекватности

$$S^2_{\text{ад}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (\overline{X}_i - \hat{X}_i)^2}{N-r}, \tag{22}$$

где $\overline{X}_i$ — экспериментальное среднее значение параметра X в i-й момент; $\hat{X}_i$ — вычисленное по уравнению регрессии (8) или (18) значение этого параметра; $r=2$ для модели вида (8); $r=1$ для модели вида (18). Затем вычисляется величина критерия Фишера

$$F = \frac{S^2_{\text{ад}}}{S^2_{\{X\}}}. \tag{23}$$

Если значение F не превышает табличного, то с соответствующей доверительной вероятностью модели считаются адекватными опытным данным.

Таблицы значений $F_{\nu_1, \nu_2, \alpha}$ для различных степеней свободы ν_1, ν_2 и уровня значимости α приведены, в частности, в [29, 36].

Полученные оценки параметров $\hat{A}$ и $\hat{B}$ содержат общую информацию о степени результирующего влияния внешних факторов на рассматриваемые электрические параметры и характеристики электронных приборов.

Далее проводится тщательное математико-статистическое сравнение результатов испытаний приборов в нескольких различных условиях или режимах, для того чтобы установить, являются ли математически подобными процессы, протекающие в этих условиях или режимах.

В рассматриваемых случаях критериями подобия являются величины:

— для модели вида (8)

$$K_1 = X/At; \quad K_2 = X/B;$$

— для модели вида (18)

$$K = X/At.$$

Условия подобия изменения параметров записываются так:

— для модели вида (8)

$$C_X = C_B = C_a C_t \text{ или } C_X/C_a C_t = 1$$

и

$$C_X/C_B = 1;$$

— для модели вида (18)

$$C_X/C_a C_t = 1.$$

Если условия подобия выполнены и установлено, что климатические факторы в нескольких различных условиях испытаний оказывают существенное влияние на зависимости изменения исследуемых параметров приборов от времени, т. е. если в соотношении $C_X/C_a C_t = 1$ при $C_X = 1$ величина $C_t \neq 1$ или при $C_t = 1$ величина $C_X \neq 1$, а в соотношении $C_X = C_B = C_a C_t$ при $C_X = 1$ величины $C_B \neq 1$ и $C_t \neq 1$, то необходимо провести сравнительную оценку эмпирических данных с помощью коэффициентов

жесткости воздействий, определяемых из следующих соотношений:

— для модели вида (8)

$$K_{в} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{A_2 (X - B_1)}{A_1 (X - B_2)}$$

и

$$K_{вl} = \frac{A_1 t + B_1}{A_2 t + B_2};$$

— для модели вида (18)

$$K_{в} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad \text{и} \quad K_{вl} = \frac{X_1}{X_2} = \frac{A_1}{A_2}.$$

Определив, насколько существенно отличаются результаты испытаний в различных условиях, т. е. насколько более интенсивно воздействуют внешние факторы в одних условиях испытаний по сравнению с другими, необходимо в нескольких сходственных точках эмпирических прямых определить интегральное подобие процессов, протекающих в исследуемых приборах.

Проведя статистическое сравнение эмпирических прямых и убедившись в интегральном подобии процессов, протекающих в изделии в нескольких условиях или режимах, следует, базируясь на этих результатах, выявить влияние факторов окружающей среды на процессы в электронных приборах, приводящие к изменению их параметров и отказам. С этой целью необходимо раскрыть физический смысл коэффициента A линейных моделей, т. е. скорости изменения параметров, свойств или показателей надежности. Для этого следует воспользоваться данными предыдущих исследований, результатами лабораторных испытаний и другими данными о зависимостях, характеризующих процессы и определяющих скорость изменения параметров или возникновение отказов электронных приборов.

Как было указано выше, у большинства классов электронных приборов эта скорость является функцией одного или нескольких внешних факторов и может быть представлена

— линейной зависимостью

$$A = a_1 y_1 + a_2 y_2 + \ldots + a_m y_m;$$

— экспоненциальной зависимостью

$$A = a_0 \exp(a_1/y_1)$$

или (для процессов увлажнения)

$$A = a_1 y_1 \exp(a_2/y_2),$$

где $y_j (j=\overline{1,m})$ — воздействующие факторы; $a_p (p=\overline{0,m})$ — постоянные величины, характеризующие особенности приборов, качество и физические свойства материалов.

При **линейной** зависимости скорости изменения параметров от внешних факторов полное изменение параметра X за время t в соответствии с соотношением $\Delta X = \sum_{l=1}^{k} A_l \Delta t_l$ после описанных выше преобразований (стр. 113) принимает вид:

— для модели (8)

$$X = At + B = B + t \sum_{l=1}^{k} p_l (a_1 y_{1l} + a_2 y_{2l} + \ldots + a_m y_{ml}); \quad (24)$$

— для модели (18)

$$X = At = t \sum_{l=1}^{k} p_l (a_1 y_{1l} + a_2 y_{2l} + \ldots + a_m y_{ml}). \quad (25)$$

Оценка коэффициентов $a_p (p=\overline{1, m})$ моделей (24) или (25) производится, как указано выше, (стр. 115), путем совместной обработки зависимостей (8) или (18), полученных в N различных условиях испытаний, причем N должно быть больше m.

Для рассматриваемого вида линейных моделей порядок вычислений следующий: *

1. Составляют матрицы B- и Z-вида

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \ldots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \ldots & b_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \\ b_{m1} & b_{m2} & \ldots & b_{mm} \end{bmatrix}; \quad Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ z_m \end{bmatrix},$$

* Основные элементы матричной алгебры изложены в специальной литературе, например в [14, 29].

для чего используются значения коэффициента A функциональных зависимостей (8) или (18), построенных для каждого i-го условия испытаний ($i=\overline{1,N}$), а также значения факторов, воздействующих в каждом i-м условии испытаний и их повторяемости.

Элементы матриц B и Z определяются выражениями

$$z_j=\sum_{i=1}^{N} A_n \sum_{l=1}^{k_n} p_{nl} y_{jl};\ j=\overline{1,m};$$

$$b_{jf}=\sum_{i=1}^{N}\left(\sum_{l=1}^{k_n} p_{nl} y_{fl}\right)\left(\sum_{l=1}^{k_n} p_{il} y_{jl}\right);\ f,\ j=\overline{1,m}.$$

2. Определяют коэффициенты $a_p\,(p=\overline{1,\ m})$ из матричного равенства

$$A=\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_m \end{bmatrix}=B^{-1}Z,$$

где B^{-1} — матрица, обратная матрице B.

3. Определяют дисперсии оценок $a_p\,(p=\overline{1,\ m})$ по формуле

$$S^2_{\{a_j\}}=b^{-1}_{jf} S^2_A,$$

где b^{-1}_{jf} — элемент матрицы B^{-1}.

4. Проверяют адекватность моделей экспериментальным данным с использованием формул (14), (22)—(23), где $r=m$ и в качестве переменной X выступает величина A — скорость изменения параметра X, а величина $S^2_{\{x\}}$ представляет собой дисперсию величины A, вычисленную по формуле (13).

5. Проверяют значимость коэффициентов моделей с помощью критерия Фишера для отношения дисперсий

$$F=S^2/S^2_{\hat{A}},$$

где

$$S^2_{\hat{A}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (A_i - \hat{A}_i)^2}{N - m};$$

A_i — значения коэффициента A в формулах (8) или (18), полученные на первом этапе построения моделей; $\hat{A}_i$ — значения, рассчитанные для i-го условия испытаний по формуле

$$\hat{A}_i = \sum_{l=1}^{k} p_l (a_1 y_{1l} + a_2 y_{2l} + \ldots + a_m y_{ml}).$$

Величина S^2 подсчитывается следующим образом:

— если проверяется одна переменная y_k, $S^2 = a^2_k / b^{-1}_{kk}$; число степеней свободы $\nu = 1$;

— если проверяется группа из p переменных,

$$S^2 = \frac{A_p^{\text{т}} [B_p^{-1}]^{-1} A_p}{p}; \quad \nu = p,$$

где индекс «т» означает операцию транспонирования; A_p — вектор-столбец, составленный только из выбранной группы параметров a_k [29]; B_p^{-1} — матрица из соответствующих элементов b_{jk}^{-1}. Например, если подсчитывается эффект исключения переменных y_1, y_3, y_4 из модели, содержащей $y_1, y_2, \ldots, y_m$, то

$$A_p^{\text{т}} [B_p^{-1}]^{-1} A_p = [a_1 a_3 a_4] \begin{bmatrix} b_{11}^{-1} & b_{13}^{-1} & b_{14}^{-1} \\ b_{31}^{-1} & b_{33}^{-1} & b_{34}^{-1} \\ b_{41}^{-1} & b_{43}^{-1} & b_{44}^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}.$$

Если отношение дисперсий F превышает значение критерия Фишера для выбранного уровня значимости, то соответствующий фактор (или группа факторов) оказывает существенное влияние на параметры модели.

При положительном исходе вычислений и анализа зависимости вида (24) или (25) являются окончательными моделями, описывающими процессы.

Теперь рассмотрим **экспоненциальную** зависимость скорости процессов от внешних факторов вида

$$A = a_1 y_1 \exp\left(\frac{a_2}{y_2}\right).$$

Формула (18) при этом может быть записана в виде

$$X = ta_1 \sum_{j=1}^{k} p_j y_{1j} \exp\left(\frac{a_2}{y_{2j}}\right), \tag{26}$$

а формула (8) в виде

$$X = B + a_1 t \sum_{j=1}^{k} p_j y_{1j} \exp\left(\frac{a_2}{y_{2j}}\right). \tag{27}$$

Порядок вычислений оценок коэффициентов a_1, a_2 моделей (26) и (27) следующий:

1. Выбирают начальные приближения параметров a_1, a_2.

2. Вычисляют элементы матриц

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_1}{\partial a_1} & \frac{\partial A_1}{\partial a_2} \\ \frac{\partial A_2}{\partial a_1} & \frac{\partial A_2}{\partial A_2} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial A_N}{\partial a_1} & \frac{\partial A_N}{\partial a_2} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial A_i}{\partial a_1}\right)^2 & \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial A_i}{\partial a_2}\right)\left(\frac{\partial A_i}{\partial A_1}\right) \\ \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial A_i}{\partial a_2}\right)\left(\frac{\partial A_i}{\partial A_1}\right) & \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial A_i}{\partial a_2}\right)^2 \end{bmatrix};$$

$$Z = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} E_i \left(\frac{\partial A_i}{\partial a_1}\right) \\ \sum_{i=1}^{N} E_i \left(\frac{\partial A_i}{\partial a_2}\right) \end{bmatrix},$$

где

$$\frac{\partial A_i}{\partial A_1}=\sum_{j=1}^{k_i} p_{ij}y_{1j}\exp\left(\frac{a_2}{y_{2j}}\right);$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial a_2}=a_1\sum_{j=1}^{k_i} p_{ij}\frac{y_{1j}}{y_{2j}}\exp\left(\frac{a_2}{y_{2j}}\right);\ i=\overline{1,N};$$

$$E_i=A_i-a_1\sum_{j=1}^{k_i} p_{ij}y_{1j}\exp\left(\frac{a_2}{y_{2j}}\right).$$

3. Приращения параметров a_1 и a_2 вычисляются как элементы матрицы

$$\Delta A=\begin{bmatrix}\Delta a_1\\ \Delta a_2\end{bmatrix}=B^{-1}Z.$$

4. Вычисляют новые приближения параметров a_1 и a_2 по рекуррентным формулам

$$a_1^{(n+1)}=a_1^{(n)}+\Delta a_1^{(n)};\ a_2^{(n+1)}=a_2^{(n)}+\Delta a_2^{(n)}$$

до тех пор, пока не будет выполнено условие

$$\max_j\left|\frac{a_j^{(n)}-a_j^{(n-1)}}{a_j^{(n-1)}}\right|\leqslant\gamma;\ j=1,\ 2,$$

где γ — наперед заданное малое положительное число; n — номер приближения.

5. Определяют дисперсии оценок a_1 и a_2 по формуле

$$S^2_{i\ \{a_j\}}=S^2_{\widehat{A}_i}\,b_{jj}^{-1},$$

где

$$S^2_{\widehat{A}_i}\approx S^2_{A_i}\sum_{l=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\left(\frac{\partial A}{\partial a_l}\right)\left(\frac{\partial A}{\partial a_j}\right)b_{lj}^{-1};$$

$$i=\overline{1,N};\ r=2.$$

6. Проводят оценку адекватности модели экспериментальным данным, используя формулы (22) и (23),

где $r=2$ и в качестве переменной X выступает величина A — скорость изменения параметра X, а $S^2_{\{x\}}$ — есть дисперсия величины A, определенная при аппроксимации изменений параметра X во времени прямыми вида (8) или (18).

При положительном исходе вычислений и анализа зависимости вида (26), (27) являются окончательными моделями, описывающими рассматриваемые процессы.

7.3.2. Построение экспоненциальных моделей

Если зависимость электрических параметров или эксплуатационных характеристик приборов от времени аппроксимируется функцией вида

$$X=B\exp(At), \tag{28}$$

то для определения коэффициентов A и B ее необходимо привести к линейному виду с помощью следующих преобразований:

$$\ln X=\ln B+At; \quad X'=A'+B't,$$

где $X'=\ln X$; $A'=\ln B$; $B'=A$.

Дальнейшее вычисление оценок A' и B' и их доверительных интервалов проводится по формулам (9)—(17), а переход к модели (28) — по формуле $B=\exp A'$.

Условия подобия для модели вида (28)

$$C_B/C_X=1; \quad C_A C_t=1,$$

а критериями подобия являются величины

$$K_1=X/B; \quad K_2=At.$$

Таким образом, необходимым условием подобия в данном случае является постоянство коэффициента A для одних и тех же моментов времени, т. е. в N условиях испытаний должно выполняться требование $A_i=A_j$ $(i, j=\overline{1, N})$.

Коэффициенты жесткости воздействия определяются из соотношений

$$K_в=\frac{t_1}{t_2}=\frac{\ln(X/B_1)}{\ln(X/B_2)}; \quad K_{в1}=\frac{X_1}{X_2}=\frac{B_1}{B_2}.$$

Проведя необходимые вычисления и убедившись в интегральном подобии рассматриваемых зависимостей,

следует раскрыть физический смысл значений коэффициента A.

Если изменение исследуемого параметра X во времени представлено зависимостью вида (28), то, используя рассуждения, применяемые при построении линейных моделей, можно получить модель изменения параметра для случая, когда зависимость коэффициента A от воздействующих факторов имеет вид

$$A=\sum_{i=1}^{m} a_i y_i,$$

в форме

$$X=B\exp\left[t\sum_{l=1}^{k} p_l(a_1y_{1l}+a_2y_{2l}+\ldots+a_my_{ml})\right], \quad (29)$$

а для случая, когда зависимость коэффициента A от воздействующих факторов имеет вид

$$A=a_1y_1\exp(a_2/y_2),$$

в форме

$$X=B\exp\left[t\sum_{j=1}^{k} a_1p_jy_{1j}\exp\frac{a_2}{y_{2j}}\right]. \quad (30)$$

Для определения коэффициентов a_1, a_2 модели (29) воспользуемся тем, что сумма в показателе экспоненты есть параметр A модели (28), т. е.

$$A=\sum_{l=1}^{k} p_l(a_1y_{1l}+a_2y_{2l}+\ldots+a_my_{ml}).$$

Тогда оценка коэффициентов a_j $(j=\overline{1,m})$ модели (29), адекватности полученной модели экспериментальным данным и значимости коэффициентов может проводиться в соответствии с алгоритмом, изложенным выше (в п. 1—5 для построения модели линейной зависимости скорости процессов от внешних факторов).

Для определения коэффициентов a_1, a_2 модели (30) можно считать, что сумма в показателе экспоненты есть параметр A модели (28):

$$A=\sum_{j=1}^{k} a_1p_jy_{1j}\exp\left(\frac{a_2}{y_{2j}}\right).$$

Оценка коэффициентов a_1, a_2, адекватности модели экспериментальным данным, а также значимости коэффициентов проводится в соответствии с алгоритмом, изложенным выше (в п. 1—5 для построения моделей, линейных по времени и экспоненциальных по внешним факторам зависимостей).

При положительных результатах вычислений и анализа зависимости вида (29) или (30) являются окончательными моделями, описывающими рассматриваемые процессы.

7.4. Программа вычислений с помощью ЭВМ

Большой объем вычислений при оценке параметров и свойств математических моделей диктует необходимость применения ЭВМ для сокращения времени при проведении расчетов. При составлении программы вычислений с помощью ЭВМ можно воспользоваться тем, что к настоящему времени разработано и опубликовано большое количество алгоритмов решения задач математического описания объекта в виде полинома определенного порядка, задач линейной алгебры, корреляционно-регрессионного и дисперсионного анализа и т. д., записанных либо в системе команд конкретных вычислительных машин, либо на универсальных алгоритмических языках [37].

В данном случае представляют наибольший интерес алгоритмы вычисления линейно-экспоненциальных и экспоненциальных моделей, приведенных выше [формулы (8), (18), (24), (25), (28) — (30)].

Составление программы вычисления параметров моделей вида

$$X = At; \quad X = At + B; \quad X = B\exp(At)$$

несложно, достаточно разработано в специальной литературе и поэтому здесь не приводится.

Определение коэффициентов моделей вида:

$$X = At = t\sum_{l=1}^{k} p_l(a_1 y_{2l} + a_2 y_{2l} + \ldots + a_m p_{ml});$$

$$X = At + B = t \sum_{l=1}^{n} p_l (a_1 y_{1l} + a_2 y_{2l} + \ldots + a_m y_{ml}) + B;$$

$$X = B \exp \left[t \sum_{l=1}^{k} p_l (a_1 y_{1l} + a_2 y_{2l} + \ldots + a_m y_{ml}) \right]$$

сводится к вычислению параметров моделей $X = At$ или $X = At + B$ и решению системы линейных уравнений типа $BA = Z$ как задачи линейной алгебры, где элементы матриц B и Z для соответствующих моделей приведены в § 7.3.

Для решения этой системы линейных уравнений с помощью ЭВМ могут быть использованы алгоритмы, составленные на универсальном языке АЛГОЛ-60 и приведенные в специальной литературе [37].

Наиболее сложным является определение коэффициентов и анализ модели вида

$$X = B \exp \left[t \sum_{j=1}^{k} a_1 p_j y_{1j} \exp \frac{a_2}{y_{2j}} \right].$$

В этом случае оценки коэффициентов модели, адекватности модели экспериментальным данным, а также оценка значимости коэффициентов производятся в соответствии с алгоритмом, применяемым для построения линейно-экспоненциальных моделей с учетом необходимости оценки параметров модели вида

$$A = a_1 \sum_{j=1}^{k} p_j y_{1j} \exp \frac{a_2}{y_{2j}}.$$

Программа оценки параметров этой модели и ее адекватности экспериментальным данным приведена на рис. 16.

Программа составлена на эталонном языке АЛГОЛ-60 и может быть реализована на любой ЭВМ, имеющей соответствующий транслятор.

```
begin real a0,b0,c,a1,b1,p,q,V,S1,S;
      integer n,k,i,j,n1,n2,n3;
      read ( n,k,S,a0,b0,V,n1,n3 );
begin real array a[1:n],z [1:2],m[1:k,1:n+2],d[1:n,1:2],
      f1,f[1:2,1:2];
      read (a,m);
  H:  for j:=1 step 1 until n do
begin d[j,1]:=0; d[j,2]:=0; for i:=1 step 1 until k do
begin d[j,1]:=d[j,1]+m[i,j+2]×exp(b0/m[i,2])×m[i,1];
      d[j,2]:=d[j,2]+a0×m[i,j+2]×m[i,1]×exp(b0/m[i,2])/m[i,2]
end end;
      for i:=1 step 1 until 2 do for j:=1 step 1 until 2 do
      f[i,j]:=0; for i:=1 step 1 until n do
begin f[1,1]:=f[1,1]+ (d[i,1])↑2; f[2,2]:= f[2,2]+ (d[i,2])↑2;
      f[1,2]:=f[2,1]:=f[1,2]+ d[i,1]×d[i,2]
end;
      z[1]:=0; z[2]:=0; for i:=1 step 1 until n do
begin z[1]:=z[1]+ (a[i]- a0×d[i,1])×d[i,1];
      z[2]:=z[2]+ (a[i]- a0×d[i,1])×d[i,2]
end;
      c:=f[1,1]×f[2,2]- f[1,2]×f[2,1];
      f1[1,1]:=f[2,2]/c; f1[2,2]:=f[1,1]/c;
      f1[1,2]:=f1[2,1]:=-f[1,2];
      a1:=f1[1,1]×z[1]+ f1[1,2]×z[2];
      b1:=f1[2,1]×z[1]+ f1[2,2]×z[2];
      a1:=a0 + a1; b1:=b0+ b1; p:=(a1-a0)/a0; q:=(b1-b0)/b0;
      if abs(p)≤V∧abs(q)≤V then go to H1; a0:=a1; b0:=b1;
      go to H;
 H1:  print (a1,b1); if n3=0 then go to H2;
      for j:=1 step 1 until n do
begin d[j,1]:=0; for i:=1 step 1 until k do
      d[j,1]:=d[j,1]+ a1× m[i,j+2]×m[i,1]×exp(b1/m[i,2])
end;
      S1:=0; for j:=1 step 1 until n do S1:=S1+ (a[j]- d[j,1])↑2;
      S1:=S1/(n-2)/S; n2:=n-2; print (S1,n2,n1);
  H2: end end;
```

Рис. 16. Программа вычислений параметров экспоненциальных моделей с помощью ЭВМ.

Исходные данные для работы программы

1. n — количество условий испытаний (например, климатических зон).

2. k — количество всевозможных сочетаний значений исследуемых факторов, встречающихся хотя бы в одном из условий испытаний.

3. S — дисперсия величины A, вычисленная на предыдущих этапах исследования.

4. aO,bO—начальные приближения параметров a1, a2.

5. V — точность вычисления оценок параметров.

6. n1 — число степеней свободы, с которыми была вычислена оценка дисперсии величины A.

7. n3 — целое число. Если по каким-либо причинам не требуется производить оценку адекватности модели экспериментальным данным, то следует считать n3=0 (при этом и величины S и n1 можно считать любыми). В противном случае n3 можно придать любое целое значение.

8. a[1 : n] — массив значений величины A в каждом условии испытаний.

9. m[1 : k, 1 : n+2] — двумерный массив размерности kx$(n+2)$, в первом столбце которого приведены все значения y_1, которые встречаются хотя бы в одной из рассматриваемых зон, во втором столбце — соответствующие им значения y_2; в столбцах со второго по $(n+2)$-й приведены повторяемости значений y_{1j}; $y_{2j}(j=\overline{1,k})$ в каждой i-й зоне $(i=1,n)$, причем если данное сочетание в какой-либо зоне не встречается, следует положить соответствующую $p_{ji}=0$.

В результате вычислений определяются значения оценок параметров a_1, a_2 и при проведении оценки адекватности модели экспериментальным данным — экспериментальное значение F-критерия Фишера и значения степеней свободы ν_1, ν_2.

Из соответствующих таблиц распределения F, приведенных, например, в [29], по значениям F и заданному уровню значимости находят $F_{\text{табл}}(\nu_1, \nu_2, \alpha)$. Если $F<F_{\text{табл}}$, то модель адекватна.

Список литературы

1. **Сотсков Б. С.** Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М., «Высшая школа», 1970.

2. **Перроте А. И., Карташов Г. Д., Цветаев К. Н.** Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность. М., «Сов. радио», 1968.

3. **Даммер А., Гриффин Б.** Испытания радиоэлектронной аппаратуры на воздействие окружающей среды. Пер. с англ. М.—Л., «Энергия», 1965.

4. **Защита** радиоэлектронной аппаратуры от влияния климатических условий окружающей среды. Под ред. Г. Юбиша. Пер. с нем. М., «Энергия», 1970.

5. **Малинский В. Д.** Контроль и испытания радиоаппаратуры. М., «Энергия», 1970.

6. **Гаген И. Е., Шмидт Э. П.** Сравнительные исследования климатической стойкости и сохраняемости изделий электронной техники — основа оптимизации требований и методов ускоренных испытаний. — «Электронная техника. Сер. 12», 1970, вып. 3.

7. **Изделия** электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний. ГОСТ 16962-71, М., 1971.

8. **Публикация** 68-1 МЭК. Основные методы испытаний электронной аппаратуры и ее элементов на воздействие внешних факторов. Общие положения. Пер. с англ. М., Комитет по участию СССР в Международной электротехнической комиссии, 1969.

9. **Рекомендации** по стандартизации РС4471-74. Изделия электротехнические и радиоэлектронные. Методы испытаний на климатические и механические воздействия. Общие положения. М., Постоянная комиссия по стандартизации СЭВ, 1974.

10. **Меламедов И. М.** Физические основы надежности. Л., «Энергия», 1970.

11. **Пролейко В. М.** О системном подходе к управлению качеством в электронной промышленности. — «Электронная промышленность», 1971, № 4.

12. **Бусленко Н. П., Калашников В. В., Коваленко И. Н.** Лекции по теории сложных систем. М., «Сов. радио», 1973.

13. **Оптнер С. Л.** Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. Пер. с англ. М., «Сов. радио», 1970.

14. **Федоров В. В.** Теория оптимального эксперимента. М., «Наука», 1971.

15. **Шенк Х.** Теория инженерного эксперимента. Пер. с англ. М., «Мир», 1972.

16. **Морозов И. И., Сретенский В. Н., Дубицкий Л. Г.** и др. Системный подход к анализу причин и характера отказов изделий электронной техники. — «Электронная техника. Сер. 12», 1970, вып. 3.

17. **Richtera M.** Deterioration of electrical equipment in adverse environments. Praque. Academia, 1970.

18. **Климат СССР.** Районирование и характеристики климатических параметров для промышленных изделий. ГОСТ 16370—70.

19. **Изделия** электронной техники. Методы сравнительных испытаний в различных климатических условиях. ОСТ 11П0.094.010.72.

20. **Сретенский В. Н., Криксунов В. М.** Расчет метрологического

запаса при оценке качества изделий электронной техники. — «Электронная техника. Сер. 12», 1971, вып. 6 (12).

21. **Пролейко В. М., Сретенский В. Н.** Метрологическое обеспечение системы управления качеством изделий электронной техники. (Обзор). М., ЦНИИ «Электроника», 1973.

22. **Наставления** гидрометеорологическим станциям и постам. Ч. I., вып. 3. Л., Гидрометиздат, 1969.

23. **Единая** система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы. ГОСТ 9.039-74, М., 1975.

24. **Берукштис Г. К., Кларк Г. Б.** Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях. М., «Наука», 1971.

25. **Колоднер Г. И., Шмидт Э. П.** О методе статистической обработки результатов исследований работоспособности и сохраняемости изделий электронной техники в различных климатических условиях. — «Электронная техника. Сер. 12», 1970, вып. 6.

26. **Промышленные** изделия. Номенклатура и характеристики основных показателей надежности. ГОСТ 16503-70. М., 1970.

27. **Пролейко В. М.** Задачи технической диагностики в системе управления качеством изделий электронной техники. — «Электронная промышленность», 1972, № 7.

28. **Дубицкий Л. Г., Юдин Б. В., Ковалев Н. Ф.** и др. Методологические принципы стандартизации систем анализа брака и отказов изделий электронной техники. — «Электронная техника. Сер. 8», 1973, вып. 6.

29. **Химмельблау Д.** Анализ процессов статистическими методами. Пер. с англ. М., «Мир», 1973.

30. **Худсон Д.** Статистика для физиков. Пер. с англ. М., «Мир», 1970.

31. **Сретенский В. Н., Веденеев Ю. З., Четвертков И. И., Явринян А. Н.** Об одном методе ускоренных испытаний на сохраняемость. — «Электронная техника. Сер. 8», 1972, вып. 1.

32. **Веников В. А.** Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики. М., «Высшая школа», 1966.

33. **Гухман А. А.** Введение в теорию подобия. М., «Высшая школа», 1963.

34. **Елкин В. М.** Модели отказов при длительном хранении и при ускоренных испытаниях изделий на сохраняемость. — «Надежность и контроль качества», М., 1970, вып. 12.

35. **Линник Ю. В.** Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М., Физматгиз, 1968.

36. **Большев Л. Н., Смирнов Н. В.** Таблицы математической статистики. М., «Наука», 1965.

37. **Библиотека** алгоритмов 1б—50б. Справочное пособие. Вып. I. М., «Сов. радио», 1975. Авт.: М. И. Агеев, В. П. Алик, Р. М. Галис, Ю. И. Марков.

38. **Павленко Е. С., Шмидт Э. П.** О комплексном методе построения физико-математических моделей влияния климатических факторов на эксплуатационные свойства электронных приборов. — «Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством и стандартизация». 1976, вып. 1 (43).

39. **Павленко Е. С., Шмидт Э. П.** Модели изменения параметров ИЭТ при натурных испытаниях в различных климатических зонах СССР. — «Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством и стандартизация», 1976, вып. 8.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

1. **Методология комплексных исследований и натурных испытаний** 7

1.1. Задачи и направления исследований влияния окружающей среды на эксплуатационные показатели электронных приборов 7
1.2. Системный подход к организации и проведению комплексных исследований и натурных испытаний . . 10

2. **Анализ данных о механизме воздействия факторов окружающей среды на свойства электронных приборов** . . 28

2.1. Системный подход к проведению анализа . . . 28
2.2. Особенности воздействия климатических факторов в естественных условиях на электронные приборы . . 30
2.3. Характер отказов и процессов изменения свойств электронных приборов в естественных условиях . . . 35
2.4. Обобщенная модель воздействия климатических факторов на параметры и свойства электронных приборов 40

3. **Выбор условий проведения испытаний и необходимого оборудования** 43

3.1. Общие положения 43
3.2. Климатическое районирование территории СССР применительно к испытаниям электронных приборов . . 44
3.3. Определение условий и режимов испытаний . . . 46
3.4. Назначение и оборудование климатических испытательных станций 49

4. **Подготовка и проведение натурных испытаний** . . . 59

4.1. Общие положения 59
4.2. Определение номенклатуры и количества изделий, подлежащих испытаниям 59
4.3. Подготовка изделий к испытаниям 62
4.4. Методика проведения испытаний 67

5. **Обработка экспериментальных данных** 71

5.1. Выбор методов обработки 71
5.2. Статистическая обработка экспериментальных данных 72
5.3. Табулирование экспериментальных данных 78
5.4. Графическая интерпретация экспериментальных данных 81

6. **Анализ экспериментальных данных** 84

6.1. Системный подход к проведению анализа . . . 84
6.2. Комплексный анализ экспериментальных данных, полученных в одном условии испытаний 86

6.3. Сравнительная оценка результатов испытаний в различных климатических условиях статистическими методами 91
6.4. Комплексный сравнительный анализ результатов испытаний в различных климатических условиях . . . 96

7. Интерпретация экспериментальных данных с помощью физико-математических моделей 102

7.1. Выбор эффективных методов построения и анализа моделей 102

7.2. Комплексный метод построения и анализа физико-математических моделей по результатам натурных испытаний 104
7.3. Примеры построения некоторых наиболее распространенных моделей 116
7.4. Программа вычислений с помощью ЭВМ 129

Список литературы 133

ЭРНСТ ПАВЛОВИЧ ШМИДТ

Натурные испытания электронных приборов

Редактор **Л. В. Голованова**
Художественный редактор **А. Н. Алтунин**
Обложка художника **В. В. Волкова**
Технический редактор **В. А. Силаева**
Корректор **Л. А. Максимова**

Сдано в набор 20/V-1976 г. Подписано в печать 23/VII-1976 г. Т-12567
Формат 84×108/32 Бумага типографская № 3
Объем 7,14 усл. п. л., 7,288 уч.-изд. л.
Тираж 13500 экз. Зак. 678 Цена 36 к.
Издательство «Советское радио», Москва, Главпочтамт, а/я 693

Московская типография № 10 «Союзполиграфпрома»
при Государственном Комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Цена 36 к.