

1971 • СЕРИЯ

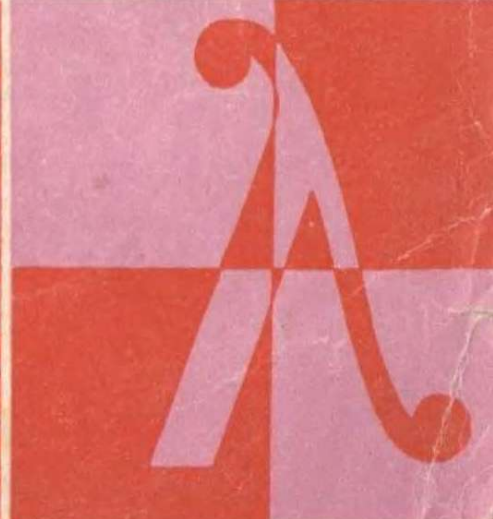
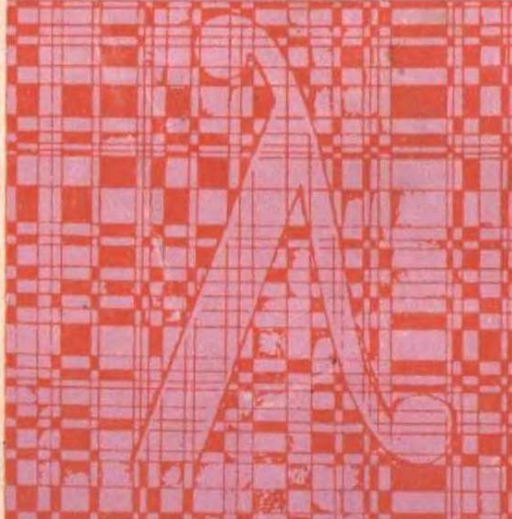
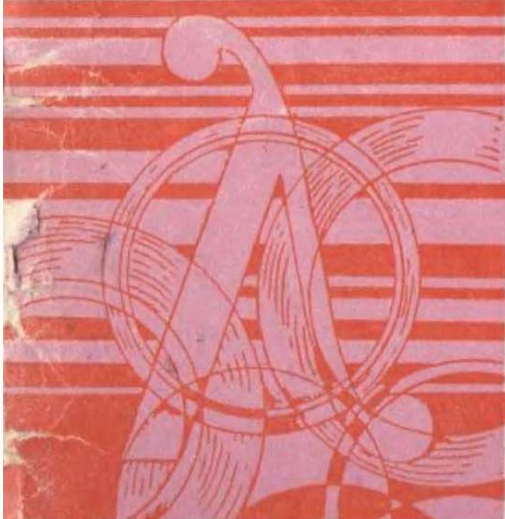
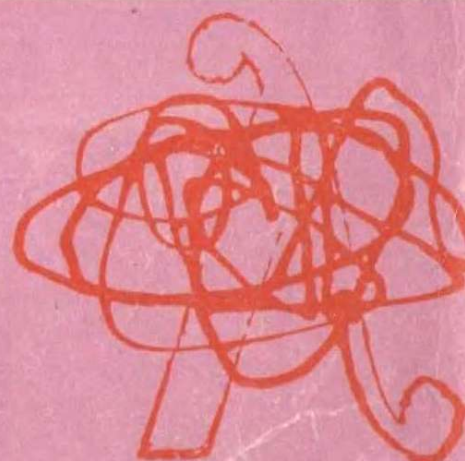


6

ТЕХНИКА

НАДЕЖНОСТЬ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Г. ВЕНИКОВ



Веников Г. В.,

кандидат
технических
наук

**НАДЕЖНОСТЬ
И ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва 1971

Веников Г. В.

В 29 Проектирование и надежность. М., «Знание», 1971, 96 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Техника», 6).

Двадцатый век называют «веком атома», «веком космоса», «веком управляющих машин» и т. д. Но как бы ни называли наше время — все сходится на одном: проблема № 1 современности — надежность. Именно вопросам надежности и посвящена аннотируемая брошюра.

На наш взгляд, ценность предлагаемого материала в комплексной постановке задачи, рассмотрении проблем надежности под углом эффективности работы оборудования. Весьма интересный материал приводится автором в разделе, посвященном современным методам проектирования.

603

3-1-1

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Вместо введения — беседа о проблемах надежности	3
Теории, задачи, вопросы	18
Проектировщики «борются» на надежность	60
Контроль, диагностика, прогнозирование — инструменты повышения надежности	77

Георгий Валентинович Веников
Проектирование и надежность

Редактор *Г. И. Флиорент*
Художник *А. А. Рюмин*
Художественный редактор *В. Н. Конюхов*
Технический редактор *А. М. Красавина*
Корректор *В. И. Гуляева*

А 09061, Сдано в набор 12/IV 1971 г. Подписано к печати 7/VI 1971 г. Формат бумаги 60×90₁₆. Бумага типографская № 3. Бум. л. 3,0. Печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,38. Тираж 65 250 экз. Издательство «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 869. Типография Всесоюзного общества «Знание», Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 18 коп.

ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ—БЕСЕДА О ПРОБЛЕМАХ НАДЕЖНОСТИ

Разговор о надежности ведется давно, во всяком случае, намного раньше появления автоматических и радиоэлектронных систем. Современная научно-техническая революция и связанная с ней комплексная автоматизация поставили эту проблему наиболее остро: надежное взаимодействие большого числа разнотипных элементов, характерное для высокоорганизованных, качественно неоднородных технических структур, определяет становление, функционирование и развитие кибернетических систем.

Поскольку автоматизация стала одним из основных направлений технического прогресса, вопросы надежности приобрели не только общетехническое, но и социально-экономическое значение: надежность применяемой аппаратуры в значительной мере определяет целесообразность и экономическую эффективность автоматизации, а потому из качественной характеристики превратилась в количественный фактор и стала одним из технических параметров устройства или системы (подобно качеству переходных процессов, точности, быстродействию и т. п.). Более того, надежность может служить характеристикой практически любого технического изделия.

В общей картине развития проблемы надежности необходимо отметить следующие принципиальные моменты.

1. Сложность современных систем не просто количественный фактор, характеризующий общее число элементов того или иного устройства; это показатель нового качества, присущего широкому классу автоматически функционирующих высокоорганизованных технических структур.

2. Возможности современной аппаратуры во многом зависят от возможностей человека-оператора. Необходимость исключения оператора можно объяснить либо быстротой контролируемых процессов, либо ограниченностью его физиологических возможностей. В то же время активное участие человека в процессе управления наряду с отрицательным эффектом (ошибки при выполнении отдельных операций) имеет

и положительное значение: его способность принимать эвристические решения, его знания и опыт позволяют предусмотреть или изменить возможные ситуации и своевременно компенсировать ухудшение качества функционирования аппаратуры управления.

3. Требования к качественным показателям работы средств автоматического управления и регулирования (безотказность и точность, износостойчивость и температуростойкость, долговечность и ремонтпригодность и т. п.) непрерывно повышаются. Зачастую отказ или неисправная работа даже ограниченного числа элементов ведет к нарушению нормальной деятельности системы в целом и в результате к непроизводительным затратам времени и материальным убыткам. Кроме того, может возникнуть угроза безопасности обслуживающего персонала.

4. Развитие техники привело к парадоксу: с повышением требований к надежности устройств автоматики техническому прогрессу сопутствовал ряд обстоятельств, снижающих надежность этих устройств и прежде всего:

— рост количества элементов в современной аппаратуре;
— более жесткие условия реальной эксплуатации: высокие механические нагрузки, широкий диапазон температур и давлений, неблагоприятные климатические условия работы и т. п. (например, среднее время безотказной работы радиоэлектронного оборудования эсминца флота США на стендовых испытаниях около 150 ч, а в процессе боевой работы всего только 1,7 ч);

— высокие темпы технического прогресса, отсюда относительно быстрый моральный износ оборудования и в первую очередь средств автоматики (для ЭЦВМ срок от начала проектирования до выпуска первого образца приблизительно 1,5—3 года, срок морального износа в среднем лишь 5—6 лет).

Количественный анализ экономических аспектов проблемы надежности, выполняемый для определения целесообразных значений себестоимости (при которых не нарушаются установленные уровни надежности), исключительно важен. Повышение надежности требует введения той или иной формы избыточности. Получить избыточность можно несколькими путями: выбрав облегченные режимы работы отдельных элементов; применяя материалы и детали повышенного качества; резервируя систему или отдельные ее части. Каждое направление требует определенных затрат. Кроме того, требования к качеству (надежности) применяемых изделий должны определяться с учетом предполагаемых условий и сроков эксплуатации (включая факторы как физического, так и морального износа).

Итак, сделаем выводы. Превышение экономически обосно-

ванного уровня надежности тех или иных систем при известном сроке службы, данной технологии и определенном качестве применяемых материалов ведет к неоправданному увеличению стоимости; в то же время тенденция к снижению себестоимости продукции без одновременного установления технически и экономически оправданного уровня минимально допустимой надежности неизбежно влечет за собой резкое повышение эксплуатационных расходов.

При разработке и реализации методов поиска неисправных элементов в сложной системе, в случае ее неработоспособности, каждому шагу итерационного процесса поиска может быть поставлен в соответствие такой критерий оптимальности, как, например, максимальная вероятность обнаружения возможной неисправности при определенных затратах на проверку или заданная вероятность обнаружения неисправности при минимальных затратах. В таких случаях каждый этап локализации неисправности характеризуют, по сути дела, два критерия: затраты на проверку и эффективность ее. Задача, следовательно, сводится к выявлению такого оптимума, при котором избыточность системы тестов не слишком велика (и, следовательно, невелики затраты на проверку), а погрешность локализации неисправного объекта не приводит к необоснованной замене чрезмерно большого количества нормально функционирующих элементов.

Выбор наиболее рационального варианта весьма существен и в каждом отдельном случае требует своего частного критерия оптимальности (в зависимости от назначения системы такими критериями могут быть себестоимость, срок окупаемости, норма прибыли, соотношение надежности и долговечности при существующих сроках морального износа оборудования и т. п.).

Избыточность — не единственный аспект, обуславливающий необходимость экономической оценки. То, что научное проектирование сложных систем возможно только при всестороннем учете фактора надежности, вообще говоря, не означает, что единственным критерием оптимальности должна быть надежность; собственно экономический критерий все же остается основным. Однако критерий надежности во многих случаях настолько совпадает с экономическим, что представляется целесообразным исходить именно из него. Более того, зная конкретный критерий надежности, его, как показывает опыт, относительно нетрудно включить в общий экономический критерий. В связи с этим решение задачи оптимизации по критерию надежности может быть получено с помощью методов математического программирования, теории игр и теории запасов, с успехом применяемых в экономических науках.

Необходимо, однако, подчеркнуть, что определение целе-

сообразных или по крайней мере оправданных количественных требований по надежности на аппаратуру самого различного назначения — один из самых сложных и до сих пор удовлетворительно нерешенных вопросов теории надежности. Попытки формализовать эту задачу для математически обоснованного решения приводили лишь к тому, что произвол в назначении количественных требований по надежности более или менее правдоподобно камуфлировался, чем создавалась определенная иллюзия обоснованности решения.

Повышение надежности разумно спроектированных систем, равно как и улучшение прочих технических характеристик, так или иначе связано с увеличением затрат на их производство. Поэтому обоснованное задание требований по надежности подразумевает оптимальное (или по меньшей мере рациональное) распределение ограниченных средств между компонентами системы.

С точки зрения обоснования требований по надежности все системы можно разделить на два основных класса:

— системы, полезный эффект от которых, так же как и убытки вследствие отказов, могут быть непосредственно измерены в денежных единицах; для таких систем принципиально возможно математически обоснованное задание требований по надежности;

— системы, от которых нельзя ждать непосредственного материального выигрыша; для них научно обосновать требования по надежности в настоящее время невозможно из-за сложности формального представления целевой функции, которая характеризует целесообразность распределения средств между различными изделиями, и невыполнимого, при современных вычислительных средствах, объема расчетных работ по численному решению задачи ее оптимизации.

На практике решение о требованиях по надежности принимается интуитивно, правда, предварительно проводят анализ существующего уровня качественных характеристик. Ну и понятно, что имеют место постоянные ошибки (например, чрезмерное завышение надежности, отсюда непомерные затраты при проектировании или производстве, или неоправданно низкие требования и как результат серьезные убытки в процессе эксплуатации). Однако в общем процессе развития техники происходит своего рода «естественный отбор», в результате которого совсем уж неправильно спроектированные изделия «вымирают». Таким эмпирическим путем формируются целесообразные нормы многих характеристик, в том числе и характеристик надежности: множество субъективных мнений формирует объективное представление о критериях целесообразного. В целом неформализованную процедуру задания требований по надежности следует считать фактором

прогрессивным, что, разумеется, не исключает необходимости поиска объективных методов оценки.

Борьба за надежность технических изделий «опирается на трех китов»: высокую надежность при проектировании изделий; обеспечение запроектированной надежности при изготовлении; сохранение достигнутой надежности при хранении и эксплуатации. Каждая из перечисленных задач объединяет множество специальных вопросов, на которые пока еще нет полного ответа. Сегодня уже недостаточно получить хорошие научные и конструкторские предложения, необходимо уметь их реально осуществить. А для этого требуется единство научных, инженерно-конструкторских и организационных усилий.

Надежность, таким образом, — комплексная проблема, охватывающая широкий круг гносеологических, научных (математических, физических, химических, биологических), инженерных (проектно-конструкторских, производственно-технологических, эксплуатационных) и экономических аспектов исследования. Дифференцированный подход к отдельным направлениям позволяет определить для каждого из них основные на данном этапе развития теории надежности, задачи.

Гносеологические проблемы связаны с отношением к надежности как к философской категории, отражающей важную сторону объективной реальности.

В области научных проблем основное внимание следует уделить;

— изучению законов распределения параметров, характеризующих надежность элементов различных классов и типов (электрических, электронных, механических и т. д.);

— изучению действия названных законов при совместном влиянии различных факторов — времени, физических и физико-химических факторов (в том числе для комплексов с взаимозависимыми элементами);

— использованию теории исследования операций для определения целесообразных требований к надежности технических изделий;

— созданию теории структурной надежности как при независимых, так и при взаимозависимых характеристиках надежности отдельных элементов и различных законах распределения времени безотказной работы;

— созданию теории структурной надежности логических сетей и оптимальных принципов резервирования;

— разработке методов построения структур с заданной надежностью при определенных ограничениях по стоимости, весу и т. п.;

— развитию методов исследования надежности сложных систем с учетом их структуры при различных законах распре-

деления времени между отказами, а также методов проектирования по заданному критерию надежности;

— разработке методов статистического моделирования процессов функционирования (отказов и восстановления) сложных систем.

Инженерная часть проблемы надежности затрагивает следующие вопросы:

— проектно-конструкторские, т. е. выбор принципиальных схем и типовых элементов разрабатываемых систем и режимов их работы, допустимых пределов изменения параметров под действием внешних факторов и т. п.;

— технологические: контроль параметров и характеристик исходных материалов, выбор допустимых механических и тепловых режимов обработки, контроль параметров и характеристик при изготовлении изделий, контроль сборочных и наладочных операций, «тренировка» и испытание готовых изделий;

— эксплуатационные: обеспечение режимов и условий работы, отвечающих выбранным техническим средствам, организация периодических проверок, наладок и ремонта, выбор оптимальных стратегий обслуживания.

Экономика в вопросах надежности не может оставить без внимания избыточность того или иного вида, а следовательно, и определенные дополнительные затраты, вызванные этим обстоятельством.

Развитие теории управления представляет значительный интерес и для решения проблем надежности. **Управление надежностью** изделий начинается с проектирования, когда «закладывается» надежность и рассчитываются оптимальные режимы эксплуатации в различных условиях. Этот процесс продолжается и при изготовлении изделия. Здесь важно своевременно вмешаться в технологию, чтобы не допустить выхода изделий с пониженной надежностью (кстати, одной из первых задач, решение которой привело к разработке теории управляемых процессов; как раз и была задача оптимального управления технологическим процессом — текущий статистический контроль качества продукции). Точно так же, когда профилактические работы можно рассматривать как разновидность задач оптимального управления.

Понятно, что можно предложить большое число вариантов задач управления процессом. Их различие будет обусловлено не только своеобразием функций, задаваемых оборудованию; но и целью, которая поставлена перед ним. Вообще говоря, решение будет различным в зависимости от того, нужно ли, чтобы оборудование выполняло свои функции возможно дольше, или же необходимо, чтобы за ограниченный срок оно дало максимум продукции (при этом можно использовать

форсированные режимы, которые при нормальных условиях для оборудования противопоказаны).

Надежность аппаратуры закладывает при разработке, конструировании системы; при проектировании устанавливается теоретическая, а в процессе изготовления — фактическая надежность каждого конкретного образца, которая зависит от качества комплектующих изделий, сборки и монтажа. После изготовления надежность поддерживается правильной организацией эксплуатации.

В практике различают следующие виды надежности технических систем:

— **схемная (структурная)**, оценка которой производится при разработке системы на основании специальных расчетов;

— **техническая (номинальная)**, определяемая по результатам испытаний в заводских (стендовых) или лабораторных условиях при работе в заданных режимах, но без учета возможностей профилактического обслуживания оборудования;

— **эксплуатационная**, которую можно определить только в реальных условиях работы при воздействии всех внешних факторов (температура, давление, влажность и др.), фактических режимов работы (параметры, нагрузки и т. п.), действительных условий технической эксплуатации (качество обслуживания во время работы, профилактические осмотры и др.).

Обеспечение требуемых показателей надежности и эффективности функционирования в процессе проектно-конструкторской разработки сложных технических систем связано с решением целого ряда проблем, а именно:

— рациональным проектированием аппаратуры (с учетом специфики производства и эксплуатации), с тем, чтобы получить нужную эффективность при минимальных затратах;

— реализацией оптимально-избыточных, высоконадежных, многофункциональных структур, рассчитанных на длительную эксплуатацию;

— разработкой структур и схем, допускающих стандартизацию и унификацию составляющих элементов;

— обоснованием принципов построения целесообразных структур сложных технических комплексов;

— разработкой методов, позволяющих до изготовления провести оценку качества системы с учетом реальных условий предстоящей эксплуатации.

Повышение показателей надежности и эффективности функционирования зависит от:

— разработки новых структур и схем повышенной надежности;

— создания конструкций приборов, учитывающих особенности их эксплуатации и места установки на объекте;

— правильного выбора режимов работы элементов;

— широкого использования принципов унификации элементов и деталей повышенной надежности;

— стимулирования разработки улучшенных элементов, прежде всего надежных электровакуумных приборов, полупроводниковых элементов, а также замены контактных устройств — бесконтактными и т. п.;

— применения предварительной тренировки элементов до установки их в изготавливаемую аппаратуру;

— автоматизации изготовления массовых элементов радиоэлектроники, что обеспечит снижение влияния субъективных факторов в производстве, высокую однородность и резкое повышение качества изделий;

— прогнозирования отказов при эксплуатации аппаратуры;

— анализа отчетных данных об отказах приборов и систем;

— организации опытной эксплуатации систем в реальных условиях, что позволит выявить наиболее слабые по надежности узлы аппаратуры, установить объем, сроки и методику профилактики, уточнить инструкции по эксплуатации, разработать первичную документацию по обнаружению и устранению характерных неисправностей, облегчить решение вопросов прогнозирования отказов, эффективно использовать полученный опыт при новом проектировании и при модернизации систем;

— подготовки квалифицированного обслуживающего персонала;

— организации на объектах сбора полных и достоверных статистических данных об отказах и простоях аппаратуры;

— разработки специальных инструкций и методик по эксплуатации систем, а также по их профилактике и ремонту.

Существующие методы повышения надежности, реализуемые как при проектировании и изготовлении, так и в эксплуатации аппаратуры, могут быть объединены в следующие основные группы:

— разработка структур с автоматическим контролем и коррекцией, устойчивых по отношению к широкому классу внешних и внутренних помех, возникающих в системе;

— применение информационной и структурной избыточности, принципиально позволяющей синтезировать надежные структуры из ненадежных элементов;

— уменьшение интенсивности отказов рациональной структурной системы и минимальным числом наиболее надежных элементов;

— облегчение электрических, тепловых, механических и иных режимов;

- разработка логических и электрических схем с ограниченными последствиями отказов отдельных элементов;
- стандартизация и унификация элементов и узлов;
- совершенствование технологии производства;
- проведение комплекса профилактических мероприятий для своевременного предупреждения отказов в процессе эксплуатации аппаратуры;

⇐ сокращение суммарного времени непрерывной работы автоматической системы, когда ее отключение на определенный промежуток времени не нарушает нормального функционирования (это метод, позволяющий рационально «расходовать» надежность системы, применим лишь при условии, что система работает с достаточно большой скважностью и переходные процессы при коммутациях не оказывают отрицательного влияния на надежность элементов);

- уменьшение среднего времени восстановления благодаря снижению числа отказов в системе (повышение надежности аппаратуры, резервирование и т. п.) и рациональной организации эксплуатации (включая мероприятия по сокращению времени, необходимого для ремонта, — применение унифицированных и блочных конструкций, автоматизация проверок и т. п.).

Еще раз подчеркнем, что уровень надежности системы определяется на этапах проектирования и изготовления аппаратуры. К эксплуатирующему персоналу предъявляется в основном требование поддерживать его. Однако при рациональной организации эксплуатации могут быть получены показатели надежности, превышающие проектные (например, правильное и своевременное проведение профилактических мероприятий с целью предупреждения отказов эквивалентно понижению расчетной интенсивности отказов системы).

Итак, начнем с первого этапа создания температуры — **этапа проектно-конструкторских разработок**. Здесь можно использовать наиболее эффективные и многочисленные методы повышения надежности. Эффективность их в том, что они принципиально позволяют строить из ненадежных элементов системы надежно реализующие заданные алгоритмы функционирования. Различают структурно-схемные и конструктивно-технологические методы повышения надежности.

Структурно-схемные методы, как понятно из самого названия предусматривают совершенствование структурных и электрических схем; основные направления следующие.

Разработка помехоустойчивых структур сложных систем. Наиболее распространенный подход к задаче повышения надежности и точности функционирования сводится к изолированному анализу отдельных составляющих результирующей ошибки. Речь идет о разработке алгоритмов, наилучшим образом аппроксимирующих решаемую задачу, об исследова-

нии способов уменьшения накопления ошибок в процессе вычисления и поиске средств, обеспечивающих надежную реализацию определенных алгоритмов. Недостаток такого подхода — необходимость применения громоздких алгоритмов для определения ошибок, что неизбежно приводит к усложнению соответствующих схем, снижению их надежности, и в довершение ко всему полностью не исключает возможности накопления ошибок.

Возможен иной, более общий, подход на основе статистического анализа ошибок, путь, характерный для современных методов исследования эффективности сложных систем. Если в соответствии с классическими методами ошибка рассматривается как некое катастрофическое отклонение хода процесса, то при вероятностно-статистическом подходе к задачам анализа и синтеза сложных структур нарушения нормального хода процесса представляются как нетипичные реакции системы, вообще говоря, свойственные ее реальному поведению. Такие нетипичные реакции в конечном счете не столько отклонения от нормы, сколько признаки статистического приближения к ней. Понятие структуры в данном случае достаточно широко и охватывает способы связи всех элементов, обеспечивающих заданное качество функционирования системы.

Подобный подход означает, что все нарушения нормального функционирования (ошибки преобразования и ввода исходной информации, ошибки, связанные с ненадежностью — отказами и сбоями элементов и электронных схем) приводятся непосредственно к ошибкам реализации заданного алгоритма. Собственно ошибки рассматриваются как существенная (но нежелательная) часть процесса функционирования, как следствие недостаточной надежности радиоэлектронного и механического оборудования и специфики практической реализации идеальных структур. Помехи при такой расширенной интерпретации — все факторы, обуславливающие нежелательные вариации результирующего поведения системы, т. е. не только искажения обрабатываемой информации и перемежающиеся отказы (сбои), но и отказы, вызванные ненадежностью элементов системы, алгоритмические ошибки реального процесса и т. п. Помехи могут корректироваться на самых различных уровнях: от структур отдельных элементов до структуры системы в целом.

Итак, синтез сводится к построению такой устойчивой структуры, нарушения в которой (интерпретируемые как помехи) не оказывают существенного влияния на правильность результирующего поведения системы.

С точки зрения защиты от ошибок помехоустойчивые структуры могут быть разделены на две основные группы: — без обратной связи по критерию правильности реали-

зации алгоритма функционирования отдельных блоков;
— с обратной связью по критерию правильности реализации такого алгоритма.

В структурах без обратной связи по критерию правильности реализации алгоритма функционирования отсутствуют специальные контрольные органы для обнаружения отказов. Избыточные элементы вводятся таким образом, чтобы выход из строя их определенного числа не приводил к отказу устройства. Неправильная работа отдельных частей устройства корректируется правильным функционированием остальных (избыточных) его частей.

Наибольший интерес с точки зрения оптимального синтеза надежных систем представляют помехоустойчивые структуры с обратной связью по критерию правильности реализации алгоритма функционирования отдельных блоков или всей системы в целом, со специальными контрольными устройствами для оценки работы аппаратуры и автоматической коррекции возникающих ошибок изменением числовых параметров структуры алгоритма или структуры самой системы.

По виду контроля помехоустойчивые системы этой группы подразделяются на структуры с обратной связью и прямым контролем, с избыточностью по методу сравнения или «голосования» (схемы многократного мажоритарного резервирования и резервирования замещением) и структуры с обратной связью и косвенным контролем, использующие помехоустойчивые коды, специальные контрольные соотношения и т. п.

В структурах с прямым контролем и пространственным резервированием контрольный орган и контролируемое устройство решают одну и ту же задачу. Несовпадение основного и контрольного решений при удвоенном объеме оборудования позволяет лишь обнаруживать ошибку, а для ее исправления приходится применять не менее трех параллельно работающих элементов. Основной недостаток структур рассмотренного класса — сложность контрольного органа (поскольку его надежность должна быть соизмеримой с надежностью контролируемых блоков).

В структурах с прямым контролем и резервированием во времени решение многократно повторяется в одном и том же блоке. Этот способ позволяет сохранить неизменным объем оборудования, однако увеличивает время решения задачи. Частный случай временного резервирования — периодический контроль вычислительного процесса подстановкой полученных результатов в уравнение исходной задачи.

Структуры с косвенным контролем предполагают неполную или косвенную оценку работы элементов по определенным признакам правильности представления информации, изменяющимся, если в процессе обработки информации возникает ошибка, и могут использовать помехоустойчивые коды,

специальные контрольные соотношения, связывающие переменные решаемой задачи и т. п.

При помехоустойчивом кодировании проверяются не правильность выполнения отдельных логических операций, а определенные признаки правильности представления информации (признаки кода), которые нарушаются, если в сообщении допущена ошибка.

В структурах с косвенной оценкой надежности для контроля используются аналитические соотношения, которые не применяются непосредственно при решении задачи, но имеют место либо между вычисляемыми величинами, либо между избыточными переменными, специально вводимыми в нее. В первом случае вид контрольных соотношений (и само их наличие) полностью зависит от характера решаемой задачи; во втором вид и количество контрольных условий выбираются в зависимости от характера ошибок и требуемой помехоустойчивости. Результаты решения контрольных условий могут использоваться не только для коррекции вычислительного процесса, но и для логического поиска отказавшего блока, а также и для перестройки системы, с тем, чтобы исключить из работы неисправные блоки (что в конечном счете позволяет сделать структуру более гибкой и повысить точность и эффективность ее функционирования).

Указанные способы позволяют контролировать и корректировать процесс функционирования системы в целом (обнаруживать и исправлять ошибки, вызываемые случайными сбоями и отказами элементов, неточностью составления алгоритмов и т. п.).

Минимизация структурных и электронных схем. Упрощение системы приводит к снижению интенсивности отказов и позволяет повысить ее надежность по таким характеристикам, как вероятность безотказной работы и интенсивность отказов, поскольку сокращение объема электронного оборудования открывает возможность резервирования системы при сохранении весовых, энергетических и иных характеристик в заданных пределах. Трудности практической реализации метода в том, что заметный эффект наблюдается лишь при значительном сокращении числа элементов. В то же время требования к точности и быстродействию автоматической системы, как правило, препятствуют ее упрощению.

Синтез рациональной структуры сложных систем с учетом надежности целесообразно осуществлять с помощью методов алгебры логики и теории конечных автоматов. Необходимо подчеркнуть, однако, что внешние различия в традиционной постановке задач, объектах, целях и методах исследования теории автоматов и теории систем автоматического управления нередко препятствуют выявлению общих для обеих теорий фундаментальных закономерностей.

В теории автоматов в настоящее время достаточно подробно исследованы вопросы минимизации и оптимизации структур, функционирование которых рассматривается в дискретные моменты времени (такты); подобные структуры — математические абстракции дискретных систем — обладают конечным множеством внутренних дискретных состояний и чаще всего предназначены для реализации логических или вычислительных операций. Общая теория систем автоматического управления изучает поведение структур с континуальным множеством состояний входных и выходных сигналов с учетом заданного критерия качества функционирования. Применение логико-математического аппарата этих двух теорий к построению реальных вычислительных и управляющих структур дает возможность синтезировать системы заданной эффективности функционирования при минимуме используемых элементов.

Схемы с ограниченными последствиями отказов. Построение таких схем проводится так, чтобы отказы отдельных элементов в крайнем случае лишь ухудшали выходные характеристики соответствующих блоков. Характерно, что при этом уменьшается не вероятность появления отказов, а их роль (важность) с точки зрения нормального функционирования системы. Результирующий эффект построения схем с ограниченными последствиями отказов — понижение интенсивности отказов системы в целом.

Проектирование элементов с широкими допусками на их параметры и внешние воздействия. Задача такого проектирования — обеспечение удовлетворительного функционирования системы при постепенном ухудшении параметров ее элементов (старении) в разнообразных условиях эксплуатации. В связи с этим возникает проблема оптимального выбора комплекса допусков на параметры элементов и внешние характеристики схемы с учетом энергетических, технологических и экономических факторов.

К конструктивно-технологическим методам повышения надежности на стадии проектирования системы относятся следующие.

Применение наиболее надежных элементов. В общем случае с повышением надежности элементов уменьшается интенсивность отказов системы, причем этот эффект тем значительнее, чем система сложнее. Однако увеличение надежности элементов неизбежно приходит в противоречие с такими характеристиками, как вес, габариты, стоимость. Стало быть, выбор конкретных элементов требует и анализа технико-экономических аспектов реализации системы.

Весьма важна также предварительная отбраковка мало-надежных элементов с помощью контроля их характеристик

и испытаний в более тяжелых условиях работы на специальных стендах.

Облегчение режимов работы элементов. Может осуществляться двумя способами: уменьшением вредного влияния окружающей среды и внешних воздействий и рациональным выбором электрических режимов работы; первое — применением надлежащей конструкции элементов и систем (амортизация, радиационная защита, искусственное охлаждение и т. п.), второе — соответствующим выполнением элементов (детали с запасом по электрическим параметрам, стабилизация питающих напряжений и т. п.). В целом выполнение этих мероприятий эквивалентно уменьшению интенсивности отказов системы.

Стандартизация и унификация элементов и узлов. Унифицированные и стандартизованные узлы тщательно отработаны проектно-конструкторски и технологически, потому у них меньшая интенсивность отказов. Кроме того, их использование значительно облегчает применение таких эффективных методов, повышения надежности как скользящее резервирование, автоматическая перестройка логической структуры и унифицированных узлов, позволяет существенно сократить время для отыскания и устранения неисправностей при эксплуатационной профилактике и ремонте.

Применение встроенного контроля и автоматической проверки правильности функционирования аппаратуры. Эти меры не оказывают влияния на основные количественные характеристики надежности, однако, позволяют улучшить такие показатели, как коэффициент готовности, коэффициент вынужденного простоя и т. д., уменьшить среднее время восстановления. На стадии проектирования выбор оптимальной процедуры поиска неисправностей проводится в общем случае для математической модели объекта, включающей перечень всех возможных неисправностей, описание типовых проверочных заданий с затратами на их проведение, характеристики надежности элементов, вероятности получения правильных заключений о их состоянии (исправлен или неисправен) по результатам проверки с учетом наличия функциональных связей между элементами в контролируемой системе (последнее, в частности, приводит к тому, что проверка некоторых элементов позволяет также получить информацию о состоянии ряда непроверенных элементов).

Этап производства. Перечислим основные мероприятия по повышению надежности аппаратуры, которые необходимо провести на стадии производства:

- совершенствование технологий и автоматизации производства, обеспечивающее высокую однородность продукции;
- непрерывный статистический контроль качества для вы-

явления причин нарушения нормального хода технологического процесса и отбраковки дефектной продукции;

— предварительная тренировка и отбраковка элементов и узлов.

Этап эксплуатации. В процессе эксплуатации расходуется надежность системы, которая была заложена при ее проектировании и изготовлении; как уже говорилось, меры по повышению эксплуатационной надежности ориентированы главным образом на сохранение этого уровня надежности (предупреждение отказов, выявление потенциально ненадежных элементов и узлов, устранение их дефектов до полного отказа). Скорость расхода надежности зависит от условий эксплуатации, квалификации обслуживающего персонала и т. п. Рациональная ее организация (правильный выбор частоты и объема профилактических мероприятий, соблюдение условий хранения запасного оборудования, регламентирование времени непрерывной работы) позволяет получать результаты, эквивалентные снижению интенсивности отказов в системе.

Обширный класс современных технических устройств составляют системы, успешное функционирование которых возможно лишь при участии человека-оператора (недетерминированные эргатические системы). Стало быть, выполнение системой установленного заданием объема операции зависит не только от надежности собственно технической системы, но и от физиологических, психических и интеллектуальных возможностей оператора, т. е. в конечном счете от его «надежности».

Влияние человека-оператора на техническую эффективность использования аппаратуры проявляется в различных формах, объединяемых в следующие основные группы:

- человек как элемент системы, обеспечивающий ее функционирование с заданной производительностью;
- человек как источник предпосылок к отказам;
- человек как элемент системы, поддерживающей надежность аппаратуры на заданном уровне;
- человек как элемент системы, обеспечивающий ее восстановление.

В плане ремонта и профилактики аппаратуры подобный подход приводит к необходимости рассмотрения сложного комплекса «человек—машина», функционирование которого может интерпретироваться как функционирование самовосстанавливающейся (благодаря обслуживающему персоналу) системы, подверженной действию случайных внешних возмущающих воздействий типа собственных отказов и ошибок обслуживающего персонала при профилактике и ремонте.

ТЕОРИИ, ЗАДАЧИ, ВОПРОСЫ...

Проблемы теории надежности в настоящее время вызывают огромный интерес, им посвящается большое число работ как экспериментального, так и математического характера. Работы эти серьезно влияют на все области общественной жизни, заставляют пересматривать сложившиеся точки зрения; ломаются ложные представления об исключительной важности только количественного роста промышленного производства.

Теоретические исследования должны быть подчинены единственной цели — разработке действенных методов повышения и сохранения надежности при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Эта большая и сложная задача требует разнообразной исследовательской и практической работы. Проникновение математических методов расчета и анализа в теорию и практику надежности ни в коем случае не направлено на ущемление качественного анализа тех физико-химических процессов, которые сопровождают потерю надежности техническими устройствами и материалами, а также конструктивных и производственных мероприятий по увеличению надежности. Количественный и качественный подходы не противоречат, а дополняют друг друга.

Теория надежности — молодая наука, ей около двадцати лет. Дату ее рождения с некоторыми оговорками можно отнести к началу пятидесятых годов. Это инженерная дисциплина, однако, она тесно связана с современной прикладной математикой, широко использует ее методы как для решения своих задач, так и для точной формулировки основных понятий. Сами определения и содержания понятия «надежность» говорят о том, что для теории надежности теория вероятностей и математическая статистика — основные методы исследований. Разумеется, объем и глубина использования математического аппарата в теории надежности не превращают ее в ветвь прикладной математики. Она остается инженерной дисциплиной, поскольку основное для нее — те реальные за-

дачи, которые выдвигаются практикой, а не методы их решения. В теории надежности необходимо под каждую задачу подбирать тот метод, который продвинет ее решение и тем самым позволит проникнуть в природу процессов, которые либо позволяют увеличивать надежность, либо уменьшают ее. Возможно, что одного метода окажется недостаточно, тогда необходимо использовать несколько различных методов.

Широкое использование математических средств не может считаться специфической особенностью теории надежности. Математизация знаний происходит на наших глазах буквально во всех отраслях науки и практической деятельности, и это не дань моде, а естественный путь научно-технического прогресса. Наука только тогда достигает совершенства, когда ей удается овладеть математическими методами. Исследователи и практики все больше проникаются мыслью, что математика и только математика есть то средство, с помощью которого в большинстве случаев вообще возможна корректная постановка задачи, четкая формулировка условий и допущений, в которых она решается. Современная техника и организация производства более чем когда бы то ни было требуют дисциплины мышления, свойственной математикам. И здесь речь идет не только и не столько о формальном использовании математических теорем, сколько о логической полноте суждений, единстве и полноте используемой классификации, недопустимости логических скачков и притянутых извне соображений.

Как ни странно, бурный рост науки приводит одновременно к росту скептицизма относительно ее возможностей. Этого не избежала и теория надежности. В последние годы среди некоторой части инженерной общественности появились известные сомнения в полезности теории надежности и полученных в ней результатов. Подобный скептицизм нашел отражение и в соответствующей литературе. Это вызвано в основном двумя причинами.

Во-первых, в теории надежности появилось немало работ, которые можно рассматривать как математическое жонглирование индексами, примитивное с точки зрения специалиста, хорошо знающего математику. Авторы таких работ не волнует применимость полученных ими результатов в практике. Нередко решаются задачи, которые не связаны с конкретными техническими проблемами, а возникают из уже решенных задач. Идет как бы саморазвитие науки, неинтересное в математическом аспекте и бесполезное в прикладном смысле. Нельзя забывать, что в работах по надежности, возможно, как ни в какой другой области знания, необходима трезвая оценка взаимного соответствия: объекта — модели, модели — математическому методу решения, метода — исходным наблюдениям. Уместно здесь привести замечание создателя ди-

динамического программирования Беллмана о том, что, работая в любой области, ученый должен идти прямой и узкой тропой между Западными Переупрощения и Болотом Переусложнения.

Вторая и главная причина недоверия к новой науке — незнание (а возможно, и непонимание) того, что можно и нужно требовать от теории надежности в процессе создания систем и чего нельзя.

При изучении свойств сложных систем возможны два основных метода исследования — макро- и микроподход. Макроподход характерен для начальной стадии изучения, когда нет никаких сведений об элементах системы. При макроподходе возможно решение ограниченного круга задач, таких, как уточнение назначения системы, определение решаемых ею задач, выяснение потоков информации, необходимых для решения этих задач, и т. п. Микроподход дает возможность расчленивать сложную систему на элементы, позволяет решать более частные, конкретные задачи.

Основанный на представлениях о макро- и микроподходе анализ любой системы независимо от ее характера, степени сложности и т. д. состоит из нескольких основных этапов, каждый из которых характеризуется своим представлением информации о проекте, отличающимся степенью детализации и спецификой решаемых задач. На всех этапах важное место отводится анализу факторов надежности и ремонтпригодности проектируемой системы, проводимому на основе методов теории надежности.

Подготовительный этап. Цель его — формулирование задач системы, разработка тактико-технических требований к ней и составление технического задания. При этом уточняются возможности системы, условия и границы ее применения и решаются общие вопросы эксплуатации. Главная роль отводится анализу задач системы (порядка 50% затрачиваемых усилий); на долю анализа методов решения таких задач и конструкторского анализа приходится примерно 25% усилий.

На подготовительном этапе задаются показатели надежности и эффективности и устанавливается их связь с другими техническими параметрами. Характеристики надежности здесь — одни из критериев выбора направления разработки, планирования и распределения ресурсов с учетом заданных сроков выполнения программы разработки и предполагаемого объема финансирования.

Предварительное проектирование. Этап предварительного проектирования (аван-проект, эскизный проект) — этап функционального анализа: исследуют функции системы, выявляют их взаимосвязь, уточняют структуру и формулируют общие алгоритмы функционирования. Все задачи решаются с помощью функциональной модели системы, детализируемой

до уровня независимых отдельно выполняемых функций. В связи с тем, что при проектировании существует несколько альтернативных вариантов построения, каждый из которых допускает возможность существенных модификаций, осуществляется отбор наиболее рационального их перебором и последовательным сравнением. На анализ структуры системы и конструкторский анализ приходится около 50% усилий, тогда как на анализ задач — примерно 15%.

Предварительное проектирование решает и задачу целесообразного распределения затрат между отдельными частями системы (подсистемами), частный аспект которой — распределение требований по надежности и эффективности между различными подсистемами, и определяет пути обеспечения требуемых характеристик отдельных подсистем.

Техническое проектирование. Разрабатываются различные варианты аппаратурной реализации системы на основе сформулированных задач и построенных функциональных моделей. Оценивается возможность реальной осуществимости каждого из вариантов с учетом факторов надежности и ремонтпригодности. Доля усилий, приходящихся на конструкторский анализ, повышается до 80%, а усилий, связанных с решением задач анализа программы, падает до 3—5%.

Основная задача теории надежности на данном этапе в том, чтобы помочь разработчику принять обоснованные решения технической реализации выбранной структуры системы, видов и объемов вводимой избыточности, организации контроля и т. п. В целом здесь теория надежности участвует в решении следующей двойственной задачи, в явном или неявном виде возникающей перед разработчиками:

— при заданных характеристиках системы (в том числе и надежности) создать систему с минимальной стоимостью;

— при заданной стоимости системы обеспечить наилучшие технические показатели (в том числе и показатели надежности).

Под стоимостью при этом могут пониматься собственно стоимость системы, ее вес, габариты и прочие ограничивающие показатели.

Важный вопрос этапа технического проектирования — проблема разработки рациональной системы контроля и поиска неисправностей. В частности, рассчитывается полнота и глубина контроля, выбирается из двух возможных путей повышения надежности (резервирование или контроль) технически и экономически наиболее выгодный, устанавливается приоритетная последовательность проверки элементов при отказе системы, выдаются рекомендации по целесообразности применения и соотношению различных видов контроля (встроенного и выносного, автоматического и полуавтоматического и т. д.).

Этап опытных образцов. Основная задача теории надежности на данном этапе — всестороннее рассмотрение вопросов эксплуатации: определение частоты и глубины профилактических и регламентных проверок; обоснование комплектации запасными элементами и предварительная проработка вопросов рациональной организации снабжения; оценка целесообразности различных режимов работы и т. д.

На этапе опытных образцов оценивается целесообразность и эффективность использования разработанной системы для решения различных технических задач, исследуются режимы ее работы (частота включений, допустимость перерывов функционирования), определяются методы целесообразной организации эксплуатации, анализируются отказы, проводится дальнейшее уточнение конструктивных, производственных и эксплуатационных требований.

На этом этапе основные усилия (75—80%) приходится на анализ операций, тогда как конструкторскому анализу уделяется до 15%.

Изготовление и испытание опытной партии. Очень важный этап: использование методов теории надежности и статистики хотя и ограничено, но весьма эффективно. Здесь теория надежности занимается планированием испытаний, оценкой их результатов, оценкой надежности сложного комплекса по результатам испытаний его компонентов, разработкой экономических планов контроля надежности и т. д.

Применение статистических методов к оценке такого параметра качества, как надежность изделия, по сравнению со статистикой традиционных параметров качества изделий имеет свою специфику. Если вероятность отказа $Q(t)$ испытываемого устройства подчиняется экспоненциальному закону $Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, где λ — надежность, то для оценки параметра λ такого распределения в настоящее время используются следующие восемь способов испытаний:

1. $[N, B, T]$ — на испытания ставятся N устройств; отказавшие устройства восстанавливаются (B) (возможно, заменяются новыми); испытания проводятся до заранее назначенного момента времени T .

2. $[N, B, r]$ — на испытания ставятся N устройств; отказавшие устройства восстанавливаются (B); испытания проводятся до момента появления r -го отказа.

3. $[N, B, (r, T)]$ — на испытания ставятся N устройств; отказавшие устройства восстанавливаются (B); испытания проводятся либо до момента t_r появления r -го отказа, если $t_r < T$, либо до заранее назначенного момента времени T , если $t_r \geq T$.

4. $[N, B, T]$ — на испытания ставятся N устройств; отказавшие устройства не восстанавливаются (B); испытания проводятся до заранее назначенного момента T .

5. $[N, B, r]$ — на испытания ставятся N устройств; отказавшие устройства не восстанавливаются (B); испытания проводятся до момента появления r -го отказа.

6. $[N, B, r]$ — на испытания ставятся N устройств; отказавшие устройства не восстанавливаются (B); испытания проводятся либо до момента t_r появления r -го отказа, если $t_r \leq T$, либо до заранее назначенного момента T , если $t_r > T$.

7. $[N, B, H, S_0]$ — на испытания ставятся N устройств; отказавшие устройства не восстанавливаются (B); испытания проводятся до такого момента t^* , что суммарная наработка $S(t^*)$ всех устройств в момент времени t^* достигает заранее назначенной величины S_0 , т. е.

$$S(t) = \sum_{i=1}^{n(t)} t_i + N(t)t = S_0,$$

где t_i — моменты отказов устройств, $i=1, 2, \dots, n(t)$ (если $S(t_N) \leq S_0$, то $t^* = t_N$); t_N — момент отказа последнего N -го устройства.

8. $[N, B, (r, S_0, H)]$ — на испытания ставятся N устройств; отказавшие устройства не восстанавливаются (B); испытания проводятся до момента t^* , который определяется как момент, когда впервые наступает одно из следующих событий: либо $S(t^*) = S$ и $n(t^*) \leq r$, либо $t^* = t_r$, но $S(t^*) < S_0$, где t_r — момент появления r -го отказа.

Испытания опытных образцов следует признать одной из самых трудных задач теории испытаний: трудности обусловлены в первую очередь малым числом образцов. Нередко их бывает всего два-три, каждый носит отпечаток индивидуальности и изготовлен, как правило, в особых условиях. Научиться же правильно оценивать по испытанию опытных образцов качество конструкции, определять ее слабые места исключительно важно, поскольку от этого зависит техника будущего. Ведь при неудачно выбранных планах таких испытаний нередко могут приниматься неудачные конструкции и отвергаться хорошие. К сожалению, на практике известны примеры как первого, так и второго рода.

Способы испытаний серийной и массовой продукции многообразны, их разработке уделялось довольно большое внимание. Однако и здесь осталось множество проблем, требующих дальнейшей разработки. В первую очередь хотелось бы указать на оценку надежности сложной системы по результатам испытаний ее компонентов. Во-вторых, тщательной разработки требует теория ускоренных испытаний. Известно, что для очень надежных элементов и технических систем для получения достоверных результатов необходимо производить большое число испытаний в течение длительного срока. Зачастую эти сроки таковы, что после их истечения интерес к содержащейся в них информации резко уменьшится или даже

совсем пропадет, поскольку, с одной стороны, уже будет обширная эксплуатационная информация, а с другой — в ряде случаев сами изделия безнадежно устареют.

Идея ускоренных испытаний проста: проводить их не в обычных, а в утяжеленных условиях. При этом отказы начнут появляться раньше и испытания удастся закончить значительно быстрее. Однако это чисто описательная сторона дела; специалиста же интересует нечто большее: как увеличение нагрузок будет сказываться на надежности? Какие закономерности следует использовать для того, чтобы по результатам ускоренных испытаний сделать заключение о поведении таких же устройств в нормальных условиях эксплуатации? Необходимо глубокое изучение законов изменения структуры вещества под влиянием тех или иных нагрузок и построение соответствующих моделей.

Интересные задачи возникают в статистике в связи с оценкой надежности сложных изделий по результатам испытаний их компонентов. Оказывается, в ряде случаев можно добиться определенной экономии, если оценивать по испытаниям не надежность каждой компоненты, а надежность всего изделия. Работы в этом направлении только начинаются.

Поскольку все в мире стареет и изнашивается, важно разработать систему правил оценки параметров и распределений длительности безотказной работы стареющих изделий.

Очень часто в теории и практике надежности приходится сталкиваться с ситуацией, когда нам неизвестны распределения, их аналитический вид. В этом случае для оценки интересующих показателей следует обращаться к непараметрическим методам статистики. Пока они еще не получили должного распространения в задачах теории надежности.

Эксплуатация. Процесс эксплуатации связан в основном с поддержанием достигнутого уровня надежности. Однако при рациональной организации эксплуатации могут быть получены показатели надежности, превышающие проектные. В связи с этим важная проблема, обращенная в основном в будущее техники, — прогноз отказов и упрощение режимов эксплуатации с тем, чтобы получить максимальный экономический эффект от изделия. Как менять режим эксплуатации изделий, чтобы отсрочить, а может, и вообще избежать отказов в заданный период? Решение таких задач связано с новым разделом математической статистики — теорией управляемых случайных процессов.

Несомненно, что огромный источник информации о качестве изделий, который до сих пор еще недостаточно используется, — сбор данных эксплуатации. Здесь приходится сталкиваться с рядом затруднений, и в первую очередь со следующими: условия эксплуатации, как правило, различны; сбор сведений об эксплуатации неполон и недостаточно точен. К со-

жалению, на эти трудности почти не обращают внимания, а они могут сильно влиять на всю совокупность собранных статистических данных.

Концепции теории надежности, используемые на этапе проектирования. В общем случае согласно современной интерпретации понятий «сложные» (большие) и «кибернетические» системы к ним в равной мере могут быть отнесены и технические, и биологические, и социальные объекты. Проблема надежности присуща всем кибернетическим системам и проявляется на многих уровнях структурно-логической организации материи. Подробное ее рассмотрение — важный момент познания сложной иерархии уровней надежности. В основе единого характера проявления природы надежности лежит материальное единство мира, отсюда понятна необходимость анализа природы надежности на самых различных уровнях — элементарных частиц, атомном уровне, уровне молекулярных взаимодействий, элементов технических систем, а также на уровнях органической и социальной форм движения материи.

Фактор надежности играет немаловажную роль и в научных исследованиях: отсюда необходимость в изучении проблематики надежности и в сфере науки. Здесь, в частности, важное значение имеет методологическая роль достоверности и надежности результатов экспериментальных исследований, не застрахованных от ошибок (например, погрешностей измерения, неполноты или недостаточной достоверности исходной информации) в формировании тех или иных научных теорий, равно как и при проектировании сложных систем. В итоге роль фактора надежности в современной методологии науки и техники не ограничивается лишь измерением и описанием; принцип надежности оказывается весьма действенным и достаточно общим принципом теоретического анализа и практического преобразования (синтеза) современных кибернетических систем.

Надежность, таким образом, объективно присуща различным материальным системам и служит объективным критерием эффективной определенности явлений и материальных систем. Благодаря тому что надежность может рассматриваться как неотъемлемое свойство кибернетических систем, принципиально возможно охарактеризовать эффективность последних, установив объективную меру соотнесенности действенных актов системы с ее функциональным назначением.

Философские концепции надежности. Общезначимость понятия надежности служит основанием для рассмотрения ее как философской категории, отражающей важную сторону объективной реальности. Можно указать и ее альтернативу — понятие нарушения (отказа, неисправности), находящегося в неразрывной связи с понятием надежности, причем таким

образом, что характер взаимоотношений между ними составляет содержание закона, определяемого законом единства и борьбы противоположностей.

Для кибернетических систем это закон единства и взаимозависимости надежности и нарушения: надежное функционирование системы всегда подразумевает нарушение (отказ, неисправность), обусловливаемое воздействиями внутренней или внешней среды, как необходимый момент внутреннего противоречия. Закон единства надежности и нарушения имеет статистический характер и действует интегрально; его проявления имеют место на достаточно большом отрезке времени или при изменении структуры системы.

Надежность в соответствии с изложенным представляет такую сторону процессов, которая характеризует степень эффективности и устойчивости их протекания и выражена количественно. Особенность ее в том, за определенным пределом она может перейти в противоположность (нарушение), качественно изменив ход процесса. Надежность тесно связана с качеством и количеством, необходимостью и случайностью, с такими понятиями, как целесообразность, вероятность и устойчивость. Отсюда логически вытекает необходимость исследования и других категорий, как, например, сложность, избыточность, эффективность, таких представлений, как система, структура, функционирование и т. д.

Анализ гносеологических проблем надежности свидетельствует об актуальности задачи построения определений основных понятий и категорий теории надежности, центральным среди которых является понятие «надежность». В настоящее время известно более двадцати различных определений термина «надежность». В одних она оценивается с качественной стороны, в других — с количественной. Для качественных определений общее то, что надежность интерпретируется как факт выполнения различными системами возлагаемых на них задач; для количественных — вероятностно-статистическая трактовка удовлетворительного функционирования системы и, в частности, сохранения ее параметров в течение определенного промежутка времени при заданных условиях.

Наиболее полные определения термина «надежность» предложены в государственных стандартах СССР ГОСТ 13377-67 и ГОСТ 13216-67, утвержденных Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР. В ГОСТ 13377-67 дано следующее определение понятия «надежность»: «Свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки»¹. Согласно ГОСТ 13216-67 на-

¹ СССР. Государственный стандарт, ГОСТ 13377-67, Надежность в технике. Термины. М., 1969, стр. 1.

дежность определяется как «свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки и обусловленное безотказностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью»¹. Таким образом, понятие «надежность» характеризует объективно реальное свойство изделия и определяется с привлечением понятий «безотказность», «долговечность», «ремонтпригодность», а следовательно, и понятий «исправность», «работоспособность» и «отказ».

Следует, однако, отметить, что названное определение локально и предназначается лишь для технических объектов. Для широкого круга систем, изучаемых не только в технике, но и в различных областях естествознания и социологии, существующие определения не могут считаться приемлемыми. Весьма важно, стало быть, выработать более общее определение надежности, в равной мере пригодное для технических, естественных и социальных наук. Один из вариантов такого определения формулируется следующим образом: «Общая надежность есть мера способности системы (иерархии систем) поддерживать и сохранять устойчивость состояний и процессов в течение определенного или неопределенного времени в данных условиях деятельности».

Необходимое условие надежности любой кибернетической системы — ее избыточность. Философский смысл избыточности в том, что она — как бы момент преодоления противоречия между «необходимостью» и «случайностью». В общем случае анализ феномена избыточности следует проводить, исходя из принципов целесообразного в технике, живой природе и в общественной сфере. Степень избыточности структурно-информационных отношений в значительной мере определяет соотношение надежности и нарушения в функционирующей системе. Более того, избыточность может служить критерием уровня организованности; например, свойство самоорганизации присуще лишь системам с достаточной степенью сложности и, в частности, избыточностью структурно-информационной организации.

Характерно, что для кибернетических систем важна не только структурная, связанная в основном с дублированием структурных элементов и отдельных блоков, но и информационная избыточность, благодаря которой обеспечивается статистически достоверная передача и переработка информации при наличии помех. Так как при рассмотрении функцио-

¹ СССР. Государственный стандарт. ГОСТ 13216-67. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации. Надежность. Общие технические требования и методы испытаний. Приложение 5. Определение некоторых терминов для изделий ГСП, встречающихся в стандарте. М., 1968, стр. 15.

нирования кибернетических систем основное внимание уделяется их информационной природе, становится возможным характеризовать качественно различные кибернетические системы точной количественной мерой — уменьшением энтропии. В «борьбе» с энтропией системы используют негэнтропийный принцип информации и принцип избыточности кибернетических систем.

Феномен избыточности — элементарная, по сути дела, единица фундаментальной проблемы надежности — тесно связан с проблемой целесообразности. Природа целесообразности технических систем покоится на их внутренней организованности; в основе целесообразной работы лежит достаточная надежность структурно-информационных и логических отношений, которая позволяет системе в целом функционировать безотказно и обеспечивает достоверность реализации процессов приема, переработки, передачи и накопления информации. Такая логическая взаимозависимость проблем надежности и целесообразности (отражающая объективную связь между ними) — принцип обратной связи, основа целесообразного поведения систем, обеспечивающий надежность действия ее регуляторов.

Целесообразность искусственных кибернетических систем — в значительной мере отражение биологической целесообразности, сознательно воспроизводимой человеком. Случайные и вероятностно-стохастические процессы, лежащие в основе потенциальной избыточности мозга, не являются строго детерминированными и в этом смысле необходимыми. Случайность здесь выступает как дополнение необходимости; такого рода случайность становится необходимым условием надежного функционирования кибернетических систем.

Анализ методов исследования проблемы надежности свидетельствует о единстве и взаимозависимости таких подходов, как детерминистский, вероятностный и эвристический. Это единство и взаимопроникновение методов в науке обусловлены материальным единством мира и новыми тенденциями в развитии научного познания. Динамическая и статистическая закономерности кибернетических систем лишь подчеркивают вероятностную природу их надежности.

В настоящее время выработаны действительно научные критерии надежности. Математический аппарат дает возможность оценивать качество систем количественными характеристиками, которые позволяют судить о вероятности сохранения характеристик в течение определенного промежутка времени при заданных условиях функционирования.

Надежность систем, основанных на вероятностных принципах, значительно возрастает по сравнению с детерминированными структурами, реализуемыми на тех же технических средствах. При этом существенно, что речь идет о надежно-

сти качественно иного типа, надежности — характеристики процесса, в котором реализуются и преодолеваются отказы и ошибки. В подобных системах происходит диалектический переход от жестко детерминированного («правильного») к статистическому процессу, при котором априори, абстрагируясь от полностью безошибочного решения, вводится понятие вероятности достижения приемлемого решения.

Анализ «смешанных» систем типа «человек—машина» как типичного случая кибернетических систем неизбежно приводит к необходимости их изучения с точки зрения проблемы надежности. Такого рода системы обладают весьма важным в плане надежности специфическими особенностями, обусловленными тем, что их структура включает человека-оператора как необходимое звено, без которого машина не может функционировать. Понятно, что все более и более актуальной становится проблема взаимодействия (и даже своеобразного «симбиоза») человека и машины.

Наряду с анализом структурной и функциональной надежности кибернетических систем возникает необходимость исследования проблемы надежности в ее социальном аспекте.

Вероятностно-статистические концепции надежности. Частная интерпретация общей математической модели в зависимости от постановки задачи и выбранного метода ее решения может осуществляться различными способами, среди которых основные:

— вероятностно-статистическая оценка, позволяющая определить такие характеристики надежности, как вероятность безотказной работы, частота отказов, среднее время безотказной работы и т. п.;

— выбор оптимальной системы допусков на параметры элементов — процесс необходимый в связи с производственно-техническим разбросом параметров и их уход от номинальных значений под влиянием случайных дестабилизирующих факторов. Учет влияния постепенных отказов на эффективность функционирования тесно связан с оценкой серийно-пригодности изделий и с расчетом режимов работы отдельных деталей в условиях случайного отклонения параметров; кроме того, необходимо обеспечить требуемую ремонтпригодность аппаратуры (взаимозаменяемость отдельных блоков и узлов при номинальном объеме регулировочных работ);

— анализ устойчивости и динамической точности функционирования сложных систем является естественным обобщением задач вероятностного анализа надежности и оптимального выбора допусков, предполагает учет совокупного действия катастрофических (полных) и постепенных (неполных) отказов и сводится к анализу статистической эффективности функционирования.

Динамические свойства сложных систем зависят от воз-

мушающих воздействий, параметров и начальных условий. Параметры как нестабильные в эксплуатации являются случайными функциями времени и имеют определенные законы распределения вероятностей фактических значений. Следовательно, задачи анализа устойчивости, качества переходных процессов, точности должны решаться с учетом возможных случайных изменений параметров, т. е. исследованием дифференциальных уравнений, коэффициенты которых — коррелированные случайные функции времени.

Вероятностно-статистические концепции надежности рассматривают отказ как полную или частичную утрату изделием работоспособности. Отказы интерпретируются как поток случайных событий, причинная связь между которыми существенно зависит от особенностей построения и эксплуатации рассматриваемого класса систем. Характер отказа решающе влияет на методику расчета надежности, на способы построения надежных схем, обнаружения и локализации отказа и т. п. В ряде случаев сформулировать понятие отказа для данной конкретной системы бывает чрезвычайно сложно: вследствие того что не существует научно обоснованных критериев для установления допусков на выходные характеристики системы, последние носят субъективный характер. Следовательно, уточнение определений понятий надежности и отказа требует более широкого подхода к исследованию надежности сложных автоматических систем. Поэтому имеет смысл «развернуть» характеристику перечисленных способов интерпретации общих математических моделей.

Вероятностно-статистические оценки надежности базируются на статистическом подходе к изучению таких случайных событий, как отказ и восстановление, с помощью математической статистики и теории вероятностей. Математическая статистика определяет методику обработки данных массовых наблюдений над случайными явлениями. Методы теории вероятностей помогают обосновать правила действия над вероятностями, являющимися объективной мерой возможности осуществления случайного события, и исследовать закономерности отказов как массовых случайных явлений. Принцип связи между математической статистикой и теорией вероятностей легко сформулировать, если истолковать вероятности статистически, т. е. определять вероятность как некоторое теоретическое значение, около которого колеблется эмпирическая частота случайного события. Изучаемые случайные события (отказы, восстановления) носят массовый характер, допускающий многократную реализацию в практически однородных условиях; количественные характеристики надежности получают при этом вероятностную трактовку.

Отказы при эксплуатации сложных систем возникают в неопределенное время, образуя в течение достаточно дли-

тельного периода последовательность (поток) отказов. Вид потока определяет свойства системы и критерии надежности, аналитические зависимости между количественными характеристиками надежности, а также методы ее расчета.

Время между рядом лежащими отказами в потоке — непрерывная случайная величина, полностью определенная с вероятной точки зрения, если известна ее функция распределения. В теории надежности это время характеризуется производной от функции распределения, т. е. дифференциальным законом распределения, которым описана одна из количественных характеристик надежности — частота отказов.

Случайные величины в зависимости от их физического смысла могут иметь различные законы распределения. В теории вероятностей известно большое число таких законов. Однако рассматривать количественные характеристики надежности имеет смысл только для их ограниченного числа. Это обусловлено тем, что на практике время между отказами определяется лишь конкретными законами распределения. Поэтому методы исследования надежности можно подразделить на две группы в зависимости от вида кривой распределения времени безотказной работы (время между отказами).

1. Методы, основанные на предположении справедливости экспоненциального (показательного) закона распределения времени безотказной работы. Интенсивность отказов за расчетный период при этом предполагается постоянной, т. е. считается, что старение элементов отсутствует, а вероятность безотказной работы на данном временном интервале зависит от его длины и не зависит от времени предшествующей работы.

Применимость экспоненциального закона определяется характером отказов элементов: наиболее точно экспоненциальным законом описываются внезапные отказы независимого, случайного характера (поток отказов является простейшим). При расчетах надежности экспоненциальный закон получил наибольшее распространение, главным образом из-за простоты расчетных формул. Правда, это не всегда достаточно обосновано (с точки зрения специфики работы исследуемой системы) при оценке надежности стареющих элементов. Расчетная функция надежности в таком случае имеет заниженное значение для всех моментов времени, не превосходящих среднее.

2. Методы, использующие гипотезы о ряде других законов распределения времени безотказной работы: нормальном законе, законах Рэля и Вейбулла, гамма-распределении.

При распределении времени возникновения отказов по закону Гэля предполагается, что происходит интенсивное старение аппаратуры и характер отказов не отвечает условиям стационарного случайного процесса; целесообразность при-

менения закона Рэлея ограничивается исследованием аппаратуры с явно выраженным эффектом старения.

Нормальное распределение (в усеченной форме, т. е. при неотрицательных длительностях безотказной работы) типично для постепенных отказов электрических и механических элементов, когда речь идет об анализе надежности сложных систем с учетом ухода параметров за допустимые пределы.

Следует отметить, что у реальных элементов могут совмещаться постепенные и внезапные отказы: в элементе может иметь место внезапный отказ, однако параллельно происходит его старение; последнее приводит к постепенному отказу (если до этого произошел внезапный отказ). Считая независимыми эти два вида отказов, можно получить кривую распределения времени безотказной работы как суперпозицию экспоненциального и нормального законов.

Гамма-распределение — характеристика времен возникновения отказов в сложных электромеханических системах в тех случаях, когда имеют место мгновенные отказы элементов начальной стадии эксплуатации или в процессе отладки системы (т. е. является удобной характеристикой распределения времен возникновения отказов аппаратуры в ее приработке). Гамма-распределению удовлетворяет также распределение времен возникновения отказов резервированных систем с резервом по способу замещения (при условии, что потоки отказов основной системы и всех резервных простейшие). Кроме того, с помощью гамма-распределения удовлетворительно аппроксимируются те законы надежности, у которых функция плотности распределения отказов имеет несимметричный вид.

Распределение Вейбулла, как и гамма-распределение, может служить характеристикой надежности аппаратуры в течение времени ее приработки, использоваться при ускоренных испытаниях. Нередко закон Вейбулла применяется для аппроксимации распределения времен безотказной работы механических элементов (систем) в период их старения. Необходимо отметить, что закон Вейбулла более общий, нежели экспоненциальный закон надежности.

Суперпозиция перечисленных распределений применяется при оценке надежности системы после длительного периода эксплуатации. В этом случае отдельные законы распределения времен возникновения отказов характеризуют ее надежность на ограниченных временных интервалах, длительность которых зависит от специфики конструктивно-схемной реализации аппаратуры и условий эксплуатации (например, период приработки описывается гамма-распределением, в процессе нормальной эксплуатации справедлив экспоненциальный закон надежности, а период старения характеризуется нормальным распределением).

Временной цикл нормальной эксплуатации ($T_{\text{экспл}}$) сложной системы складывается из таких составляющих, как время подготовки аппаратуры к работе (t_1), время собственно работы (безотказной работы) (t_2), время простоя (t_3) в период между сеансами работы, время ремонта аппаратуры (t_4), (сюда входят дополнительные составляющие, связанные с обнаружением, локализацией и устранением отказа), время профилактики (t_5) и может быть описан формулой:

$$T_{\text{экспл}} = \sum_{i=1}^s t_i.$$

Нормальный цикл эксплуатации может деформироваться в зависимости от условий эксплуатации и от назначения системы, в связи с чем полной характеристикой надежности должны служить длительность цикла нормальной эксплуатации и число циклов j в течение всего периода эксплуатации:

$$T_{\text{экспл}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^s t_{ij}.$$

Однако указанные составляющие не характеризуют отдельных циклов периода эксплуатации, а потому не позволяют сформулировать научно обоснованные нормы времени эксплуатации, ремонта, профилактики и т. п. В связи с этим практическое применение находят количественные характеристики надежности, достаточно полно определяющие отдельные составляющие t_{ij} . Зависимость между временными составляющими нормального цикла эксплуатации выражают коэффициенты, устанавливающие связь между временем работы и временем простоя.

Надежность не может быть оценена какой-либо одной количественной характеристикой; необходимо целое семейство характеристик, определяющих надежность устройств как в период работы, так и в период простоя. К числу таких характеристик относятся: вероятность безотказной работы, частота отказов, средняя частота отказов, интенсивность отказов, среднее время безотказной работы, среднее время между соседними отказами. Это характеристики вероятностного характера, они дают возможность оценить надежность простых элементов и сложных систем в процессе их работы и хранения; однако, пользуясь ими, нельзя установить соотношения между временными составляющими цикла эксплуатации (учет времени, затраченного на ремонт и профилактику, удобство и стоимость эксплуатации, готовность аппаратуры к действию и т. п.). В связи с этим вводятся дополнительные количественные характеристики, именуемые коэффициентами надежности. Большое число разнообразных коэффициентов надежности может быть объединено в следующие группы:

— коэффициенты, характеризующие соотношение между

временем работы и временем простоя аппаратуры (коэффициенты готовности, вынужденного простоя, профилактики);

— коэффициенты, характеризующие частоту профилактических мероприятий;

— коэффициенты, характеризующие влияние надежности элементов, установленных в данной аппаратуре, на ее надежность (коэффициенты отказов, расхода элементов, относительный коэффициент отказов);

— прочие коэффициенты надежности (например, коэффициент стоимости эксплуатации).

Необходимо отметить, что отказы, равно как и временные составляющие циклов эксплуатации и простоя, представляют собой случайные события. В связи с этим количественные характеристики надежности могут иметь как вероятностное, так и статистическое толкование; первое необходимо при априорном (теоретическом) анализе надежности, второе — при апостериорном (экспериментальном) определении отдельных характеристик, либо по результатам натурных испытаний, либо по данным статистического моделирования поведения исследуемой системы.

Критерии и методы оценки надежности в значительной мере зависят от назначения и условий эксплуатации исследуемого устройства. Классификация подобного рода в целом ряде случаев достаточно условна, поскольку нередко трудно установить границу между отдельными группами.

В зависимости от функционального назначения и условий эксплуатации можно выделить две группы систем:

разового действия, для однократного использования и неремонтируемые в процессе эксплуатации;

многократного действия, для длительной работы: допускают возможность ремонта при эксплуатации.

Основная мера надежности устройств, от которых требуется непрерывная работа в течение заданного промежутка времени, — вероятность безотказной работы в течение этого интервала времени. Количественные характеристики надежности устройств, по условиям эксплуатации допускающих возможность отключения и ремонта, в общем случае определяются не только вероятностью безотказной работы в течение заданного периода, но и вероятностью выполнения ремонта за определенный интервал времени.

Выбор тех или иных количественных характеристик надежности зависит от класса системы (разового или многократного использования), способа соединения элементов (основное или с резервированием), состояния системы (рабочее или в условиях хранения), а также характером отказов (мгновенные или постепенные).

Указанные характеристики надежности достаточны для оценки качества функционирования системы при его дихото-

мической интерпретации (система либо работоспособна, либо неработоспособна). Однако особенностью современных сложных технических систем является не столько большое число элементов, сколько сложность внутренней структуры (наличие обратных связей, резервирования и т. п.). В связи с этим возникает задача применения более общих оценок, характеризующих качество (в том числе и надежность) выполнения системой возложенных на нее функций с учетом того обстоятельства, что в ряде случаев отказы отдельных элементов лишь уменьшают возможности, но не делают недопустимым дальнейшее применение системы. Тогда для оценки качества функционирования применяются показатели или функции эффективности. В общем случае мерой эффективности называется количественный показатель, который характеризует степень (качество) выполнения системой своего основного назначения и оценивает ее приспособленность к реализации поставленных задач.

Подобный подход предполагает оценку совокупного влияния полных и частичных постепенных отказов на качество функционирования, в том числе и на такие характеристики системы, как устойчивость, точность и т. п. Оценка эффективности функционирования заключается в исследовании поведения системы в зоне допустимых значений отдельных параметров с учетом влияния случайных отклонений остальных параметров. При этом для исследуемой системы строится математическая модель, устанавливающая связь между существенно влияющими внутренними, внешними входными и выходными параметрами. С помощью такого рода модели определяется распределение выходных параметров в сечении случайного процесса и по найденным вероятностным характеристикам поведения системы в различные моменты времени формулируется количественная оценка качества функционирования с учетом надежностных и функциональных характеристик ее элементов.

Выбор показателя эффективности, по существу, заключительная стадия процесса формулирования целей и задач системы. Вместе с тем показатель эффективности оказывает существенное влияние на интерпретацию свойств системы и результатов ее исследования, так как делает описание целей и задач системы вполне законченным.

Функциональная эффективность сопоставляет две основные характеристики системы: требуемую вероятность достижения цели в определенных условиях эксплуатации и при определенном уровне влияния внутренних факторов; затраты в широком смысле, которые необходимо осуществить в указанных условиях для достижения цели с требуемой вероятностью. Для того чтобы показатель эффективности достаточно полно характеризовал качество работы системы, он должен

учитывать все ее основные особенности и свойства, а также условия функционирования и взаимодействия с внешней средой. Таким образом, показатель эффективности зависит от структуры системы, значений ее параметров, характера воздействий, внешних и внутренних факторов. Другими словами, он определяется процессом ее функционирования. Следует подчеркнуть, что в сложных системах редко удается установить один общий показатель эффективности с определенным физическим смыслом. Поэтому, как правило, приходится перечислять некоторое множество частных показателей. В связи с этим представляется целесообразным обратить внимание на потенциально обширные, но мало исследованные возможности теории подобия как методологической основы построения обобщенных показателей качества функционирования и степени соответствия проектируемой системы поставленным задачам.

Вероятностно-статистическая оценка позволяет определить такие характеристики надежности, как вероятность безотказной работы, частота отказов, среднее время безотказной работы и т. п. В простейших случаях — для необслуживаемых в процессе эксплуатации систем — эти характеристики определяются с помощью основных теорем теории вероятностей или как плотности либо функции, распределения, или как числовые характеристики случайных величин. Если функционированию отдельных элементов системы присущи различные законы распределения, но они при этом взаимосвязаны, то на величину количественных характеристик надежности исследуемого объекта оказывают влияние и такие факторы, как относительная значимость (важность) отдельных выходных характеристик, алгоритмы восстановления отказавших элементов и отыскания неисправностей и т. д.: эффективность функционирования в общем случае исследуется методами теории массового обслуживания. Такой подход — методологическая основа существующих методов расчета надежности.

Решение реальных задач в подобных случаях связано с математическим моделированием, позволяющим имитировать реализацию рассматриваемых процессов. Однако необходимо подчеркнуть, что полную картину может дать только сочетание методов статистического моделирования с методами физического моделирования и натурными экспериментами.

Выбор оптимальной системы допусков на параметры элементов. Установить допуски на элементы схемы необходимо из-за неизбежного производственного (технологического) разброса значений параметров элементов и их ухода от номинальных значений под влиянием случайных дестабилизирующих факторов. Анализ точности системы, т. е. учет влияния постепенных отказов на эффективность ее работы, оказывает

ся тесно связанным с расчетом режимов работы отдельных элементов и узлов в условиях естественного случайного разброса параметров. Кроме того, необходимо учесть и обеспечение требуемой ремонтпригодности аппаратуры с точки зрения взаимозаменяемости отдельных блоков и узлов при минимальном объеме регулировочных работ (и, следовательно, дополнительных элементов подстройки и регулировки).

Широко применяемые способы уменьшения числа отказов (облегчение электрических режимов и внешних условий эксплуатации аппаратуры, резервирование, проведение регламентно-профилактических работ) не позволяют полностью исключить появление отдельных отказов (как внезапных необратимых, так и постепенных и перемежающихся). Однако степень их влияния существенно зависит от правильного выбора допусков на характеристики используемых элементов, равно как и на входные и выходные электрические параметры радиоэлектронных схем. Поэтому определение оптимальной системы допусков сводится к выбору такой их совокупности, при которой обеспечивается максимальная надежность системы при одновременном действии различных отказов.

Оптимальный выбор системы допусков требует, с одной стороны, выявления критических параметров отдельных элементов (т. е. таких параметров, которые могут характеризовать приближение полного отказа), с другой — учета всей совокупности случайных дестабилизирующих факторов, определяющих изменение первичных ошибок (старение, температура и т. п.) с учетом корреляционных зависимостей между параметрами отдельных элементов.

В общем случае расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры предполагает знание следующих характеристик:

- зависимости между входными и выходными параметрами системы и отдельных ее узлов;
- изменения выходных параметров узлов в зависимости от разброса характеристик отдельных элементов;
- изменения выходных параметров узлов под воздействием случайных дестабилизирующих факторов (помехи, флуктуации напряжения питания и т. п.) и старения;
- зависимости выходных параметров узлов от паразитных характеристик;
- корреляционных зависимостей между параметрами элементов схемы.

Расчет допусков немыслим без учета технологических особенностей изготовления отдельных схемных элементов по суммарному допуску, учитывающему производственный разброс отдельных параметров, их уход под действием внешних факторов (температура, радиация и т. п.) и вследствие старения.

Устойчивость и динамическая точность функционирования сложных систем. Предполагают учет совокупного действия катастрофических (полных) и постепенных (неполных) отказов на надежность функционирования системы. Надежность (эффективность) при такой интерпретации заключается в том, что выходные сигналы системы с определенной вероятностью сохраняют надлежащую точность в течение определенного интервала времени; анализ ее для сложной системы требует предварительного анализа точности функционирования отдельных узлов.

Концепция целенаправленного изменения динамических характеристик сложных систем в соответствии с заданным показателем эффективности. Характерная особенность современных методов синтеза сложных кибернетических систем — переход к статистическим (уже описанным нами) принципам организации их работы. Ошибки в этом случае представляются как некоторые нетипичные (нежелательные) реакции системы, свойственные, однако, ее реальному поведению. Синтез происходит с учетом возможных ошибок функционирования таким образом, чтобы уменьшить их влияние на конечное поведение системы.

Повышение эффективности функционирования сложных кибернетических систем может быть обеспечено не только увеличением надежности отдельных их цепей и узлов, но и целенаправленным изменением динамических свойств системы в зависимости от изменения свойств и характеристик внутренней и внешней среды. Особенность такого подхода в том, что изменяются не только отдельные числовые параметры алгоритма управления, но в ряде случаев и сама структура системы или алгоритма ее управления. Иными словами, имеет место варьирование весовых коэффициентов относительной важности (значимости) отдельных состояний, в которых может находиться рассматриваемая система (или значимость потери ею этих состояний из-за отказов элементов, сбоев и т. п.).

Общее решение подобной задачи пока еще не найдено; известные частные решения могут быть объединены в следующие основные группы:

— системы, использующие принципы инвариантности (методы автоматической компенсации неисправностей);

— системы, реализующие принципы адаптации (самонастраивающиеся; самообучающиеся, с переменной структурой);

— системы с временной и пространственной избыточностью (резервированные, с помехозащищенным кодированием обрабатываемой информации, с алгоритмическим контролем правильности функционирования);

— биокибернетические системы, использующие закономер-

ности живой природы для построения надежных структур из искусственных (технических) элементов.

Идеи теории инвариантности положены в основу построения непрерывных систем управления с автоматической компенсацией возмущений, или инвариантностью регулируемой величины от возмущений; их поведение описывается в общем случае дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. В системе, на которую одновременно влияют несколько возмущений, могут быть созданы такие условия, когда любая координата достигает избирательной (селективной) инвариантности, т. е. становится независимой от одного или нескольких возмущений.

Поскольку неисправности типа постепенных отказов — частный случай изменения параметров системы во время ее работы, применение принципа инвариантности позволяет устранить их последствия или предупредить появление, т. е. в итоге повысить структурную надежность системы.

Применение принципа адаптации позволяет строить самоорганизующиеся и самонастраивающиеся системы, которые изменяют свою структуру и стремятся приблизиться к оптимальному режиму в тех случаях, когда параметры и характеристики объекта регулирования меняются в значительных пределах по заранее неизвестному закону. Существенно в данном случае то, что во всякой самоорганизующейся системе управления имеется обратная связь по критерию качества, реализуемая специальным устройством управления. Устройство воздействует на числовые параметры или структуру алгоритма работы основной системы, если реакция объекта не удовлетворяет заданному критерию качества.

С точки зрения реализации такого управляющего воздействия нет принципиальной разницы в том, что привело к ухудшению качества работы: быстрое изменение свойств окружающей среды или внутренние причины. Применение принципа самонастройки (обратной связи по критерию эффективности функционирования) позволяет системе не только отрабатывать нестационарные внешние воздействия, но приспосабливаться к отдельным внутренним неисправностям, типа постепенных отказов. К более широкому классу неисправностей, включающему катастрофические отказы, могут приспосабливаться «обученные» самоорганизующиеся системы, наделенные способностью создавать новые цепи взамен ранее существовавших.

Применительно к дискретным управляющим и вычислительным системам из большого числа однотипных элементов эффективный путь повышения надежности — применение временной и пространственной избыточности. В первом случае речь идет о самокорректирующихся (помехоустойчивых) кодах и схемах с алгоритмическим контролем правильности

Функционирования, во втором — об их пространственных (схемных) эквивалентах (схемах со структурной избыточностью). Сочетание пространственной и временной избыточности позволяет строить дискретные схемы, инвариантные относительно широкого класса внутренних неисправностей; наличие наряду с избыточностью цепей обратной связи делает доступным более высокий уровень надежности (при синтезе надежных систем из ненадежных элементов методами обратных связей необходима дополнительная оценка целесообразного соответствия между структурной и временной избыточностью с учетом влияния на надежность функционирования количества частей системы, охваченных обратными связями, и предельных возможностей этого способа синтеза).

На практике многие кибернетические системы не могут быть отнесены к чисто дискретным или чисто аналоговым. Поэтому практическое решение проблем структурного синтеза надежных эффективных многофункциональных комплексов в общем случае требует разумного сочетания методов теории надежности, принципов инвариантности и адаптации, методов введения временной (кодовой) и пространственной (структурной) избыточности, теории обратных связей.

Биокибернетические аспекты исследования ориентированы на моделирование в технических системах информационных механизмов процессов управления, присущих живым системам, и, в частности, способности живой системы к непрерывному структурному обновлению, перестройке в процессе работы (без прекращения выполнения основных функций), т. е. обеспечению оптимальных условий жизнедеятельности организма и автоматического подключения механизмов самовосстановления (самосохранения) в патологических (аварийных) режимах.

Бионика в данном случае предстает как наука, одна из основных задач которой — вскрыть сущность особенностей структурной организации и механизмов переработки информации живыми организмами, обеспечивающих высокую надежность взаимодействия организма с окружающей средой, и использовать установленные принципы для повышения надежности кибернетических систем.

Физико-технические концепции теории надежности. В отношении деталей машин и конструкций вопросы надежности и долговечности начали обсуждаться сравнительно давно, во всяком случае раньше появления радиоэлектронных систем. Цель расчета машин на надежность и долговечность — обеспечение некоторой количественной гарантии в том, что при заданном режиме эксплуатации в течение запроецированного срока службы ни по одной из деталей не будет превзойдено ни одно из установленных предельных состояний изношенности. Специфические признаки предельных состояний ра-

ботоспособности машин следующие: усталостные разрушения, предельные зазоры между трущимися поверхностями сопряженных деталей, утрата необходимой точности взаимодействия частей, повышение рабочей температуры.

На базе идей статистической теории прочности и теории накопления повреждений при случайных перегрузках исследуются вопросы прочности строительных материалов, износа и старения деталей, долговечности конструкций и машин и т. п. Цель подобных исследований — построение физических гипотез о природе деформирования и разрушения твердых тел, разработка статистических теорий хрупкого и усталостного разрушения материалов, выявление характеристик и закономерностей износа и старения конкретных деталей и образцов материалов, находящихся в определенных условиях применения и т. д.

Дальнейшее развитие физико-технические концепции теории надежности получили при возникновении радиоэлектроники. Речь шла о повышении надежности выпускаемых радиоэлектронных приборов (резисторов, полупроводниковых триодов и т. п.) и об экспериментальном определении характеристик надежности с помощью лабораторных испытаний, методов искусственного (ускоренного) старения и пр. Следует подчеркнуть, что разработка методов ускоренных испытаний на надежность не только отдельных элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры, но и целых устройств и даже систем позволяет создать своего рода цепь с обратной связью по надежности до ввода проектируемой системы в эксплуатацию.

Актуальность работ в этом направлении применительно к построению высоконадежных сложных радиоэлектронных систем обусловлена постоянным ростом надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры. Как ни парадоксально, но повышение надежности элементов ведет к своеобразному противоречию в анализе и синтезе надежных систем.

Дело в том, что проверить на практике значения показателей надежности в большинстве случаев крайне затруднительно: для некоторых элементов и устройств уже сейчас интенсивность отказов характеризуется значениями порядка 10^{-11} 1/ч. В таком случае для подтверждения, с достоверностью порядка 90%, данных об интенсивностях отказов необходимо провести проверку в объеме приблизительно $2,3 \cdot (10^{-11} - 10^{-12})$ элементо-часов при условии отсутствия отказов. Нельзя не учитывать, что результаты испытаний при одном комплексе условий не могут быть непосредственно распространены на другой комплекс условий работы аппаратуры. В то же время усовершенствования конструкции и технологии производства в процессе серийного изготовления и эксплуатации аппаратуры значительно снижают реальную

ценность затрат на предварительную проверку надежности.

Короче говоря, те параметры надежности, которыми обычно оперируют при расчетах, в значительной мере умозрительны или приближены и отражают фактическую надежность системы только тогда, когда они основаны на опыте эксплуатации в достаточной степени идентичных прототипов исследуемых систем. Естественно, возникает необходимость разработки методов получения показателей надежности на основании испытаний имеющихся единичных образцов отдельных устройств.

В итоге необходимость фиксации оценок надежности вступает в противоречие с задачей совершенствования аппаратуры! Многочисленные методы расчетной оценки надежности сложных радиоэлектронных устройств, разработке которых в настоящее время уделяется большое внимание, в целом не могут серьезно изменить положение, поскольку они базируются на недостаточно достоверной информации об интенсивности отказов элементов и влиянии на ее изменение режимов нагрузки и различных внешних факторов. Стало быть, возникает вопрос о справедливости и целесообразности использования в ряде случаев вероятностных критериев интегральной количественной оценки надежности, не вскрывающих истинных причин отказов.

Итак, перед нами задача критической оценки существующих методов расчета надежности радиоэлектронной аппаратуры с помощью анализа физико-химических процессов, процессов, которые приводят к появлению тех или иных отказов. При подобном подходе, не умаляя роли вероятностно-статистических методов, делается акцент на таких аспектах, как изучение конкретных физических причин (а не только самого факта) отказов, построение методик отбора исходных материалов для изготовления элементов и монтажа аппаратуры, исключающих возможность появления отказов, разработка методов прогнозирования надежности элементов с точки зрения физико-химических процессов в них, определение масштабных коэффициентов пересчета данных о надежности при определенных условиях испытаний к иным условиям и т. д.

Следует подчеркнуть, что основным средством повышения надежности изделий нужно считать выбор материалов и максимальное использование их свойств. Для этого необходимы глубокое знание качеств испытываемых материалов и их изменения в зависимости от времени и нагрузок.

До последнего времени при создании методов расчета надежности изделий использовались только грубые статистические подходы, в которых либо совсем не отводится, либо отводится подчиненное место учету изменений физико-химического состояния материалов, из которых созданы изделия. Основой всего были статистические данные испытаний или

даже реальной эксплуатации. При таком подходе в тени остается то неизбежное изменение молекулярного строения, которое сопутствует воздействию времени и разного рода нагрузок. В силу локальных неоднородностей материалов изделия имеют некоторый случайный разброс прочностных, магнитных, электрических и прочих свойств. Именно этим объясняется то, что изделия, изготовленные из одной партии исходных материалов, в одинаковых технологических условиях, обладают характерным распределением вероятностей величин интересующих нас параметров. Наблюдающийся разброс порой очень велик. Задача прогрессивной технологии — уменьшить случайный разброс (совершенно уничтожить дисперсию невозможно, поскольку это противоречило бы природе вещей, но уменьшить ее в наших силах).

Не может вызывать сомнений, что изучение поведения материалов при различных условиях и при воздействии разнообразных нагрузок — основа расчета надежности при изготовлении и в период эксплуатации. Знание существующих здесь закономерностей может быть прочной базой для таких важных практических задач, как прогнозирование отказов, выбор оптимальных режимов эксплуатации, проведение ускоренных испытаний, выявление влияния на надежность смены режимов, нагрузок и т. д.

Таких испытаний проводится много, накоплен огромный экспериментальный материал, в большинстве своем еще не обработанный и теоретически не осмысленный. Сами по себе статистические материалы, даже если они собраны с огромными трудностями, не имеют исчерпывающей ценности, ценны результаты анализа и их использование.

Согласно идеям статистической физики параметры, определяющие состояние системы, изменяются от атомного строения ее элементов и того взаимодействия, которое они оказывают друг на друга, а также от внешних воздействий. Результаты и принципы статистической физики до сих пор никак не используются в теории надежности. Несомненно, пришло время для серьезного обсуждения того, как и в какой мере они могут быть применены к решению основных проблем теории надежности. Не вызывает сомнений, что принципиальный подход в теории и практике обеспечения надежности изделий должен опираться не только на эмпирический материал, но и на общие физико-химико-механические концепции.

Исключительно важен вопрос о том, как испытывать высоконадежные изделия, поскольку для испытания требуются большое число изделий и длительные сроки. Часто сроки таковы, что к моменту окончания испытаний изделия безнадежно устаревают. А число необходимых для испытания из-

делий столь велико, что во всем мире не найдется необходимого числа испытательных стендов!

Необходимо искать иные пути, необходимо незамедлительно заняться развитием теории ускоренных испытаний. Основная идея ускоренных испытаний в том, чтобы проводить их в утяжеленных условиях. При этом отказы будут наступать, как правило, раньше и за более короткие сроки удастся получить информацию об их закономерностях отказов. Однако здесь отсутствуют данные о поведении материалов, из которых изготовлены изделия, при различных условиях. Пока нет убедительных данных, которые позволили бы утверждать, что изменение условий испытаний меняет лишь значения их параметров, сохраняет вид распределений длительности безотказной работы. Скорее всего существуют критические режимы, переход за пределы которых должен менять эти распределения.

Перед исследователем открывается широкое поле работы. Действительно, согласно существующим представлениям при эксплуатации свойства материалов, из которых изготовлены элементы, узлы и изделия, меняются, причем не обязательно только в направлении ослабления: может иметь место, например, упрочнение материалов. Вдобавок, скорости изменения свойств для одинаковых изделий различны, поскольку такие изменения представляют собой случайный процесс. Но с какими процессами приходится иметь дело? Что они из себя представляют? Пока у нас нет ответов. Необходимо создавать количественные модели изменения свойств материалов при эксплуатации. Но модели должны быть подвергнуты опытной проверке, а сама проверка нуждается в развитой системе методов математической статистики.

Количественные оценки надежности и эффективности разрабатываемых технических средств. Задачи надежности сложных систем делятся на две основные группы: определение надежности существующих и прогнозирование надежности проектируемых систем.

В первом случае исследование надежности производится по известным количественным данным о надежности основных и резервных элементов и по заданным функциональным связям между ними. Цель расчета — определение количественных характеристик надежности, используемых далее для повышения эффективности исследуемой системы благодаря рациональному ее использованию и организации правильной эксплуатации (выбор частоты профилактических мероприятий и т. п.) совершенствования ее схемного решения, решения круга вопросов, связанных с комплектацией системы запасным оборудованием, организацией снабжения и ремонта аппаратуры и т. п. Надежность сложной системы определяется по характеристикам надежности отдельных элементов.

Во втором случае возникает задача синтеза системы по заданным требованиям к ее надежности. При этом в процессе проектирования рассматривается ряд самостоятельных задач:

распределение надежности между различными частями и элементами системы:

выбор подходящих элементов и способов их соединения (вплоть до

выбора: схемного решения, конструктивного исполнения и определения технологических особенностей производства);

сравнительный анализ методов резервирования и способов включения резервных элементов;

исследование и учет влияния на надежность системы вариаций параметров элементов под воздействием различных факторов и т. п.

Сложность оценки надежности проектируемой системы по сравнению с исследованием надежности существующих систем также и в том, что во многих случаях затруднительно составить блок-схему для расчета надежности разрабатываемой системы, неизвестны данные о надежности элементов, еще широко не применявшихся на практике, не выбраны их режимы работы и не определено влияние условий эксплуатации на качество функционирования системы.

Существующие методы расчета надежности можно разделить на две группы:

не учитывающие ремонт и восстановление аппаратуры и применяемые для расчета так называемой технической надежности;

учитывающие обслуживание системы и позволяющие получить характеристики надежности применительно к заданным условиям эксплуатации (т. е. с учетом соблюдения установленных нормами эксплуатации мер профилактики, текущего ремонта и иных видов восстановления аппаратуры), так называемые методы расчета эксплуатационной надежности.

В зависимости от характера отказов существующие методы можно подразделить на группы:

учитывающие лишь моменты появления отказов (т. е. обеспечивающие расчет надежности при внезапных отказах, связанных со скачкообразным изменением параметров); учитывающие процесс возникновения отказов, обусловленных постепенным ухудшением параметров элементов (т. е. позволяющие рассчитать надежность при постепенных отказах). В настоящее время наибольшее развитие получили методы, позволяющие рассчитывать надежность при внезапных отказах; методы другой группы в сущности лишь недавно начали разрабатываться.

Следует также отметить, что указанная классификация не исчерпывает всех возможных типов отказов в системе. В ряде случаев внезапное изменение условий работы может привести к нарушению функций на некотором отрезке времени с последующим самопроизвольным восстановлением нормального функционирования (например, сбой в ЭЦВМ). Анализ надежности применительно к этому виду отказов (перемежающиеся отказы) осуществляется специальными методами, дополняющими названные выше группы.

Общий недостаток большинства существующих методов расчета надежности, существенно ограничивающий область их применения — то, что они не позволяют вычислить количественные характеристики надежности как функции времени, а дают возможность лишь определить вероятность того, что выходные характеристики системы будут находиться в заданных пределах в некоторый момент времени, если до этого момента элементы проработали как бы «вне системы» при некоторых режимах, близких к реальным режимам их работы.

При исследовании надежности обычно оперируют следующими видами потоков отказов.

1. Простейший (стационарный, или однородный пуассоновский) поток отказов, при котором время возникновения отказов удовлетворяет одновременно условиям стационарности, отсутствия последствия и ординарности. Случайные события, образующие простейший поток, распределены по закону Пуассона, а закон распределения промежутков времени между соседними событиями — показательный (экспоненциальный). Применительно к сложным автоматическим системам поток отказов элементов и всей системы считается простейшим, если элементы системы работают одновременно, их отказы имеют мгновенный характер и являются случайными независимыми событиями (отсутствуют корреляционные связи между време-

нами возникновения отказов отдельных элементов), время возникновения отказов за расчетный период удовлетворяет условиям стационарного случайного процесса, отказ любого элемента ведет к отказу всей системы, в системе невозможно появление в один и тот же момент времени более одного отказа, старение элементов отсутствует, процесс эксплуатации стабилизирован (процесс приработки закончен), а условия эксплуатации сохраняются неизменными. Следует подчеркнуть, что на практике с достаточной степенью точности поток отказов может считаться стационарным лишь для ограниченного (сравнительно небольшого) временного интервала.

2. Нестационарный (неоднородный) пуассоновский поток отказов, при котором время возникновения отказов удовлетворяет одновременно только условиям ординарности и отсутствия последствия. Применительно к сложным системам, эксплуатируемым в течение длительного времени, поток отказов нестационарен (пуассоновский), если отказы элементов системы носят мгновенный характер и представляют собой случайные независимые события (отсутствуют корреляционные связи между временем возникновения отказов отдельных элементов), отказ любого элемента ведет к отказу всей системы, в системе невозможно появление в один и тот же момент времени более одного отказа, а старение элементов отсутствует. Потоки отказов такого вида наблюдаются, в частности, в период приработки аппаратуры, а также в тех случаях, когда элементы системы работают неодновременно (например, в системах с резервированием).

3. Поток с ограниченным последствием (поток Пальма, поток Эрланга первого порядка) — ординарный поток, при котором промежутки времени между последовательными событиями — независимые случайные величины; закон распределения промежутков времени между соседними событиями, в случае потока Пальма, отличается от экспоненциального. Простейший пример — резервированная система с включением ненагруженного резерва по способу замещения с единичной кратностью резервирования (поток Эрланга k -ого порядка может быть получен в том случае, если кратность резервирования системы равна k).

Наибольшее распространение при исследованиях получил анализ простейшего потока отказов, предполагающий справедливость экспоненциального закона надежности; однако в достаточной мере строго этот закон может быть применен лишь к ограниченному числу систем. Более того, в некоторых случаях (например, когда речь идет о потоке постепенных отказов сложной системы, о потоке отказов многих резервированных систем) справедливость (а следовательно, и точность) приведения к одному из перечисленных потоков недостаточна и речь должна идти уже об иных потоках, исследуемых в теории массового обслуживания.

Для расчета надежности при внезапных полных отказах применяются расчет по данным об интенсивностях отказов и коэффициентный расчет надежности. Оба метода основаны на предположении, что поток отказов исследуемой системы является простейшим и, следовательно, применим экспоненциальный закон надежности.

Существенный недостаток метода расчета надежности по данным об интенсивностях отказов отдельных элементов в том, что он позволяет получить достаточно достоверные результаты лишь при окончательном расчете сложной системы, когда изготовлены опытные образцы и экспериментально получены режимы работы всех элементов (в предположении отсутствия периода приработки). Кроме того, необходимо располагать статистическими данными о надежности различных типов элементов при различных коэффициентах нагрузки, температурах, вибрациях, влажности и т. п. На начальных стадиях проектирования, когда еще нет опытных образцов, режимы работы элементов могут быть установлены лишь предположительно, что в значительной мере снижает точность расчетов. Поэтому при ориентировочных расчетах обычно приходится предполагать, что все однотипные элементы имеют одинаковую надежность независимо от режимов работы; предположение об одинаковой надежности однотипных

элементов, вообще говоря, не обязательно, однако это существенно упрощает расчеты, так как упрощается вычисление выражения вида

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i,$$

где λ_c — интенсивность отказов сложной системы; λ_i — интенсивность отказов элементов i -ого типа; N_i — число элементов i -ого типа; r — число элементов различных типов.

Коэффициентный метод расчета надежности также справедлив в предположении экспоненциального закона надежности, однако имеет ряд преимуществ по сравнению с расчетом непосредственно по интенсивностям отказов. Упрощение расчетов достигается благодаря тому, что требования по надежности отдельных частей системы задаются не в виде количественных характеристик надежности, а в виде выражений вида

$$\sum_{i=1}^r N_i K_i = \sum_{i=1}^r \frac{N_i \lambda_i}{\lambda},$$

где r — число блоков (элементов) различных типов; K_i — коэффициент надежности элементов i -ого типа; λ_i — интенсивность отказов элементов i -ого типа; λ — интенсивность отказов элемента, принятого в качестве эталонного: при этом предполагается, что интенсивности отказов всех элементов изменяются в зависимости от условий эксплуатации в одинаковой степени (это допущение справедливо лишь при незначительных изменениях условий эксплуатации).

К числу преимуществ коэффициентного метода расчета надежности относятся:

возможность расчета надежности системы при ограниченных данных о надежности составляющих элементов;

возможность относительно несложного пересчета количественных характеристик надежности при изменении режимов работы аппаратуры;

возможность выполнения достаточно точных оценок надежности аппаратуры на начальных этапах проектирования.

Кроме того, коэффициентный метод расчета надежности позволяет с удовлетворительной точностью сравнивать надежность систем или отдельных их частей (при ограниченных данных о надежности элементов), по данным только о количественном составе элементов и коэффициентах их надежности осуществить оптимизацию системы по надежности (понимая под последней такое ее распределение по отдельным блокам, при котором блоки равной сложности имеют одинаковую надежность).

Период приработки с точки зрения расчета надежности отличается тем, что поток отказов не стационарен, интенсивность отказов изменяется в течение периода эксплуатации и, следовательно, экспоненциальный закон надежности, строго говоря, не может быть применен. Вероятность безотказной работы $P_c(t)$ при экспоненциальном законе в этом случае может вычисляться только как условная вероятность, рассчитываемая в предположении того, что на участке приработки отказы не возникают. Сущность расчета при этом заключается в том, что условно предполагается отсутствие отказов в период приработки длительностью t . $P_c(t) \cdot P_c(t)$

имеет при этом пониженное значение, т. е. $P_c(t) = A e^{-\lambda_c t}$ (A — коэффициент, учитывающий понижение $P_c(t)$ на участке приработки и определяемый экспериментальной обработкой статистических данных об отказах на начальном участке работы аппаратуры, подобной проектируемой) и, следовательно, $A = A_0 e^{-\lambda_c t}$, где $A_0 = e^{-\int_0^t \lambda_c(t) dt}$.

Для расчета надежности при постепенных отказах применяются следующие методы расчета: непосредственно, по вероятности безотказной работы; по отклонениям передаточной функции; матричный метод; метод, учитывающий непрерывное изменение параметров.

Перечисленные методы справедливы в предположении, что параметры

элементов и выходные характеристики системы изменяются во времени монотонно (например, вследствие старения и износа). Однако они не могут быть применены для оценки надежности сложных систем, у которых преобладают перемежающиеся отказы из-за флуктуационных изменений параметров элементов — следствия случайных изменений питающих напряжений, внутренних помех и т. п.

Кроме того, необходимо отметить следующее: методы расчета по вероятности безотказной работы и по отклонениям передаточной функции имеют тот недостаток, что не позволяют получить характеристики надежности в функции времени, а также не учитывают корреляционных связей между элементами; матричный метод, позволяя учесть корреляционные связи, также не дает возможности получить характеристики надежности в функции времени, а только метод расчета, учитывающий непрерывное изменение параметров, позволяет получить характеристики надежности в функции времени. Применимость перечисленных методов существенно ограничивается тем, что характеристики параметров элементов в сечениях случайного процесса их изменения, как правило, неизвестны.

Расчет надежности при постепенных отказах непосредственно по вероятности безотказной работы используется в тех случаях, когда необходимо оценить динамические свойства автоматической системы при изменении качества переходных процессов, вида частотных характеристик, области свойств и т. д. вследствие постепенного изменения и случайного разброса параметров. Вероятность безотказной работы системы в таком случае представляет собой вероятность того, что в течение заданного интервала времени ее выходные характеристики не выйдут за допустимые пределы.

Расчет надежности с учетом постепенных отказов элементов (параметрической надежности) обычно выполняется при следующих упрощающих предположениях:

— все отказы элементов — как мгновенные, так и постепенные — события независимые, и, следовательно, вероятность отказа сложной системы может рассчитываться как $Q_c = Q_s \cdot Q_n$, где Q_s — вероятность появления внезапного отказа, Q_n — вероятность появления постепенного отказа, но для описания распределения выходных характеристик и параметров элементов системы как случайных функций времени в каждый данный момент времени;

— рассеивания параметров элементов сравнимы по величине;

— выходные характеристики в области их допустимого изменения зависят от приращения параметров составляющих элементов линейно, а сама область работоспособности по i -ой выходной характеристике невелика по отношению к этой характеристике (10—15%);

— система считается отказавшей, если хотя бы одна из ее выходных характеристик уходит за границу области работоспособности.

Предположение о независимости внезапных и постепенных отказов на практике сводится к гипотезе о том, что в момент исследования надежности системы по постепенным отказам внезапные отказы не наступают. Другими словами, расчет ведется для некоторой гипотетической системы, которая составлена из тех же элементов, что и реальная, но элементы при этом проработали вне ее до момента времени t при некоторых стандартных условиях. При этом вычисляется вероятность того, что собранная из указанных элементов система в момент ее включения в работу (t) будет исправлена, т. е. ее выходные характеристики будут находиться в допустимых пределах при условии, если мгновенные отказы отсутствуют.

В общем случае, когда параметры элементов коррелированы, вероятность безотказной работы сложной системы может быть определена как вероятность того, что в момент времени t при условиях ξ каждая из n выходных характеристик будет находиться в допустимых пределах:

$$P_c(t, \xi) = \int_{a_n}^{\beta_n} \int_{a_{n-1}}^{\beta_{n-1}} \dots \int_{a_1}^{\beta_1} K(y_1, y_2, \dots, y_n) \times$$

$$\chi a(y_1, y_2, \dots, y_n) dy_1 dy_2 \dots dy_n,$$

где $a(y_1, y_2, \dots, y_n)$ — n -мерный закон распределения, представляющий собой частоту отказов выходных характеристик системы; α_i, β_i — допустимые пределы изменения i -й выходной характеристики y_i ; y_i — i -я выходная характеристика системы; $K(y_i)$ — весовой коэффициент, учитывающий относительную важность каждой из характеристик для нормального функционирования системы, причем $0 \leq K(y_1, \dots, y_n) \leq 1$.

Решение уравнения для $P_c(t, \xi)$ может быть получено, если, воспользовавшись разложением Гром—Чарли для $a(y_1, \dots, y_n)$, ограничиться первыми членами разложения. Однако практическое применение получаемого выражения затруднительно даже при анализе надежности относительно несложных систем.

В тех случаях, когда постепенные отказы отдельных элементов можно считать независимыми, а допущение о нормальном законе распределения i -й выходной характеристики — обоснованным, частота отказов и вероятность безотказной работы по i -й характеристике определяются как

$$a(y_i; t_i; \xi) = \frac{\rho}{\sqrt{\pi}} \exp(-\sigma^2 \Delta y_i);$$

$$P_{ci} (\alpha_i < y_i < \beta_i; t_i; \xi) = 0,5 [\Phi(\sigma \Delta \beta_i) - \Phi(\sigma \Delta \alpha_i)],$$

где

$$\sigma = \{ \sqrt{2} \sigma [y_i(t_i; \xi)] \}^{-1};$$

$$\Delta y_i = y_i - M[y_i(t_i; \xi)];$$

$$\Delta \alpha_i = \alpha_i - M[y_i(t_i; \xi)];$$

$$\Delta \beta_i = \beta_i - M[y_i(t_i; \xi)];$$

t_i — момент времени, для которого вычисляется надежность;

ξ — характеризует условия эксплуатации, соответствующие расчетному случаю;

$Q(t_i; \xi)$ — числовая характеристика в момент времени t_i при условиях эксплуатации ξ ;

$M[y_i(t_i; \xi)]$ — математическое ожидание характеристики y_i ;

$\sigma[y_i] = \sigma[y_i(t_i; \xi)]$ — среднеквадратичное отклонение характеристики.

При этом в силу предположения о линейности зависимости выходной характеристики от значений параметров элементов в малой окрестности рабочей точки на основании теорем о числовых характеристиках линейных функций случайных аргументов для $y = f(x_1, \dots, x_n; t_i; \xi)$ справедливы соотношения:

$$M[y_i(t_i; \xi)] = f_i(M[x_1], \dots, M[x_n]; t_i; \xi);$$

$$\sigma^2[y_i(t_i; \xi)] = \sum_j^n \left(\frac{\partial y_i}{\partial x_j} \right)^2 \sigma^2[x_j] +$$

$$+ 2 \sum_{j \neq k} \left(\frac{\partial y_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial y_i}{\partial x_k} \right) r_{jk} \sigma[x_j] \sigma[x_k],$$

где

$\frac{\partial y_i}{\partial x_j}$ — частная производная выходной характеристики y

по параметру x_j в точке, соответствующей математическим ожиданиям параметров элементов (x_1, \dots, x_n) : $M[x_1], \dots, M[x_n]$;

$\sigma[x_j] = \sigma[x_j; t_i; \xi]$ — среднеквадратичное отклонение параметра j -го элемента;

$\sigma[x_k] = \sigma[x_k; t_l; \xi]$ — среднее квадратичное отклонение параметра k -го элемента;

r_{jk} — коэффициент корреляции параметров x_j и x_k .

Таким образом, если известны зависимости выходных характеристик системы от параметров элементов и если известны в каждый момент времени t_l при условиях ξ среднее значение и дисперсия параметров элементов, то средняя частота отказов и вероятность безотказной работы при принятых допущениях определены.

В целом, однако, метод настолько сложен, что не позволяет практически вычислить количественные характеристики сложной системы при большом числе элементов и, по существу, пригоден лишь при оценке надежности достаточно простых устройств с малым числом выходных характеристик. Кроме того, в сложной системе отказы элементов — зависимые события из-за корреляционных связей между параметрами элементов. Практически этот метод представляет интерес лишь при расчете надежности сложных систем и отдельных приборов в процессе их хранения, т. е. для вычисления вероятности безотказной работы устройства в момент включения после хранения.

Метод расчета надежности по отклонениям передаточной функции проще, чем метод расчета надежности непосредственно по отклонениям выходных характеристик. Решение получается достаточно простым, если оценивать качество системы по какой-либо одной или двум характерным точкам; решение еще более просто, если допуски устанавливаются не на характерные точки, а, например, на амплитудную и фазовую характеристики системы. Существенный недостаток подобного подхода, однако, в том, что предполагается тождественность влияний на динамику системы одинаковых отклонений амплитуды и фазы при любой частоте. Кроме того, метод, как и предыдущий, фактически не позволяет определить вероятность безотказной работы системы автоматического управления в функции времени, поскольку корреляционные связи между параметрами элементов отдельных звеньев системы здесь также не учитываются.

Матричный метод расчета надежности позволяет учесть эффект последствия потока мгновенных отказов сложной системы, приводящего к перераспределению электрических нагрузок в системе вследствие изменения параметров отдельных элементов. При этом не накладывается никаких ограничений на структуру системы и способы соединения элементов в принципиальной схеме (в том числе резервирование, восстановление системы и т. п.). Сущность метода состоит в образовании матрицы возможных состояний системы, включающей все возможные события, которые могут произойти с ее элементами; при этом для каждого из возможных состояний (гипотезы) H_i указывается его вероятность $P(H_i)$.

В предположении независимости внезапных отказов отдельных элементов вероятность безотказной работы вычисляется по формуле

$$P = \sum_{i=0}^k P(H_i),$$

где $P(H_i)$ — вероятность i -й гипотезы;

k — число гипотез, при которых отказ системы не возникает, или при представлении через закон распределения времени возникновения постепенных отказов элемента α ,

$$P(H_\alpha) = \int_0^t P(A/\bar{x}_\alpha) a_\alpha(\tau) d\tau,$$

где $a_\alpha(\tau)$ — частота отказов элемента;

$P(A/\bar{x}_\alpha)$ — вероятность того, что при состоянии системы, соответствующем гипотезе H_α , не возникает внезапный отказ (событие A), вычисленная при условии, что в момент τ характеристика элемента α вышла за допустимые пределы.

Среднее время безотказной работы системы равно сумме средних вре-
мен безотказной работы при всех благоприятных гипотезах:

$$T = \sum_{i=1}^k T_i.$$

Матрица состояний системы при этом имеет вид

$$\begin{array}{c} x_1 x_2 \dots x_i H_0 \\ \overline{x_1} x_2 \dots x_i H_i \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ x_1 \dots \overline{x_\alpha} \dots x_i H_{\alpha} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ x_1 \overline{x_\alpha} \dots \overline{x_{\alpha\beta}} \dots x_i H_{\alpha\beta} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{array}$$

где x_i — означает рабочее состояние i -го элемента;

$\overline{x_i}$ — отказ i -го элемента;

H_i — гипотеза, что отказал элемент i ;

$H_{\alpha\beta}$ — гипотеза, что отказали элементы α, β в указанном порядке;

H_0 — гипотеза, что ни один элемент не отказал.

В случае экспоненциального закона надежности указанные характери-
стики приобретают вид:

$$\begin{aligned} P(H_0) &= e^{-\sum \lambda_i t} \\ P(H_\alpha) &= \frac{\lambda_\alpha}{\sum \lambda_i - \sum \lambda_i^{(\alpha)}} [\exp(-\sum \lambda_i^{(\alpha)} t) - P(H_0)]; \\ P(H_{\alpha\beta}) &= \frac{\lambda_\beta}{\sum \lambda_i - \sum \lambda_i^{(\alpha,\beta)}} \{ [\exp(-\sum \lambda_i^{(\alpha,\beta)} t) - P(H_0)] \times \\ &\quad \times \frac{\lambda_\alpha}{\sum \lambda_i - \sum \lambda_i^{(\alpha,\beta)}} - P(H_\alpha) \}; \\ T_{H_0} &= 1/\sum \lambda_i, \quad T_{H_\alpha} = \lambda_i^{-1}, \quad T_{H_0} / \sum \lambda_i^{(\alpha)}; \\ T_{H_{\alpha\beta}} &= \frac{\lambda_\beta^{\alpha}}{\sum \lambda_i^{(\alpha,\beta)}}, \end{aligned}$$

где $\lambda_\alpha, \lambda_i$ — первоначальные интенсивности отказов элементов α, β ;

$\lambda_i^{(\alpha)}$ — интенсивность отказа элемента i после возникновения отказа
в элементе α ;

$\lambda_i^{(\alpha,\beta)}$ — интенсивность отказа i -го элемента после отказа элементов
 α и β .

Выбор благоприятных гипотез осуществляется анализом (расчет, ка-
чественное рассмотрение, моделирование) схемы с искусственным введе-
нием различных видов отказов. Интенсивности отказов $\lambda^{(\alpha)}, \lambda^{(\beta)}, \lambda^{(\alpha,\beta)}$
элементов при наличии отказов других элементов могут быть определены,
если известны зависимости интенсивности отказов от коэффициента на-
грузки.

Недостаток метода — необходимость громоздких вычислений (особен-
но при оценке надежности сложных систем) и возможность учета эффекта
последствия от постепенных отказов только в предположении скачкооб-
разного изменения параметров потока отказов в моменты возникновения
постепенных отказов. Кроме того, этот метод фактически не позволяет вы-

числить количественные характеристики надежности как функции времени. В целом указанный метод наиболее целесообразно применять при разработке электрических схем отдельных узлов автоматической системы, поскольку с его помощью можно установить, как изменяется надежность при применении элементов с теми или иными допусками, а также оценить критичность влияния изменения параметров элементов на качество функционирования аппаратуры.

Сущность метода расчета надежности при непрерывном изменении параметров элементов заключается в следующем. В соответствии с общей математической моделью надежности изменения любой выходной характеристики системы y_i при изменении параметров элементов (x_1, \dots, x_n) , представляются траекторией n -мерного вектора в некотором гиперпространстве допустимых состояний D_i , в общем случае ограниченном со стороны как максимальных, так и минимальных значений.

Выражения для вероятности P_c и среднего времени безотказной работы T_c (представляющего собой среднее время пребывания выходной характеристики y_i в области D_i) имеют следующий вид:

$$P_c(t; y_i \in D) = \int_{(D)} \dots \int P(t; y_{i0}; y_i \in D_i) \varphi(y_{i0}) dy_{i0};$$

$$T_c(y_i \in D) = \int_{(D)} \dots \int T(y_{i0}; y_i \in D_i) \varphi(y_{i0}) dy_{i0}.$$

Здесь y_{i0} — начало траектории выходного параметра $y_i = f_i(x_1, \dots, x_n)$ по условию $(y_i \in D_i)$;
 x_1, \dots, x_n — параметры элементов системы;
 $\varphi(y_{i0})$ — функция распределения точек начала траектории y_i (первоначальный разброс выходного параметра); при некоррелированности параметров элементов, если $\varphi(x_{i0})$ — одномерный закон распределения параметра i -го элемента при $t=0$, то $\varphi(y_{i0}) = \prod_{i=1}^n \varphi_i(x_{i0})$;

$\varphi(y_{i0}) dy_{i0}$ — вероятность нахождения начальной точки траектории y в окрестности dy_{i0} точки y_{i0} ;

$P(t; y_{i0}, y_i \in D)$ — вероятность того, что время пребывания траектории y_i в области $D_i (y_{i0} \in D_i)$ будет больше или равно t ;

$P(t; y_{i0}; y_i \in D) = \int_{x_1} \dots \int_{x_n} P(x_1, \dots, x_n; y_{i0}) dx_1 \dots dx_n$ — вероятность того, что траектория y_i , начинающаяся в точке y_{i0} , находится в области значений параметров элементов в окрестностях dx_1, \dots, dx_n точек x_1, \dots, x_n .

При независимых случайных изменениях параметров на всем интервале $[0-t]$:

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P_i(x_{1,i}, \dots, x_{n,i}),$$

где $P_i(x_{1,i}, \dots, x_{n,i})$ — вероятность нахождения i -го элемента в области α , получаемая путем аппроксимации гистограммы, изменения параметров элементов во времени;

$T(y_{i0}; y_i \in D_i)$ — среднее время пребывания траектории в области $D_i (y_{i0} \in D_i)$;

$$T(y_{i0}; y_i \in D) = \int_{x_1} \dots \int_{x_n} P(x_1, \dots, x_n; y_{i0}) T(x_1, \dots, x_n; y_{i0}) dx_1 \dots dx_n;$$

$T(x_1, \dots, x_n; y_{i0})$ — время пребывания в области D_i траектории y_i , начинающейся в точке y_{i0} , такое, что $T(x_1, \dots, x_n; y_{i0}) \geq t$.
 Функция $T(x_1, \dots, x_n; y_{i0})$ определяется по экспериментальным данным.

Границы области D_i вытекают из требований на выходные характеристики автоматической системы и могут быть определены из условий

точности, устойчивости и т. п. или по совокупности требований на наиболее важные характеристики.

Достоинством этого метода является возможность определения количественных характеристик надежности в функции времени при любых законах распределения параметров элементов. При этом вычисляются вероятность нахождения выходных характеристик системы в допустимых пределах в течение заданного эксплуатационного периода в функции времени, а также среднее время, в течение которого выходные характеристики будут находиться в указанных пределах. Недостатками метода являются его сложность, невозможность учета корреляционных связей между параметрами элементов, а также влияния внезапных отказов на уход параметров за допустимые пределы (как всегда, предполагается, что постепенные и внезапные отказы являются независимыми событиями).

Спектральный метод может быть использован для расчета надежности при перемежающихся отказах, в случае которых система самовосстанавливается и в дальнейшем вновь работает надежно. В большинстве случаев предполагается, что поток перемежающихся отказов является простейшим, корреляционные связи между параметрами элементов отсутствуют, а внезапные и постепенные отказы не влияют на перемежающиеся отказы.

Расчет надежности в соответствии со спектральным методом выполняется в предположении, что изменение параметров элементов во времени является стационарным случайным процессом. Тогда выходные характеристики, определяемые как функции работоспособности, могут быть представлены в виде случайных функций, удовлетворяющих условиям стационарного случайного процесса. Нарушения условий работоспособности в этом случае представляются выбросами случайной функции, интерпретируемыми как перемежающиеся отказы. Средняя частота перемежающихся отказов (сбоев) представляет собой среднее число выбросов случайной функции за допустимые пределы. Остальные характеристики надежности определяются по средней частоте отказов с помощью обычных формул. В общем случае (при большом числе параметров и функций работоспособности, при потоках отказов, отличных от простейших, при наличии корреляционных связей между параметрами элементов) возможности спектрального метода весьма ограничены, и он может быть использован лишь при условии применения ЦВМ.

При проектировании мелких узлов, а также в тех случаях, когда перемежающиеся отказы отдельных относительно несложных узлов являются независимыми событиями (т. е. при ограниченном числе параметров), спектральный метод позволяет аналитически оценивать надежность системы при перемежающихся отказах. Спектральный метод, предназначенный для оценки влияния перемежающихся отказов, дополняет перечисленные выше методы, которые позволяют оценить надежность при действии внезапных и постепенных отказов, вызванных износом и старением элементов. Выбор того или иного метода зависит от характера отказов. В принципе анализ надежности системы можно выполнять и при одновременном применении нескольких методов расчета.

При расчете надежности эргатических систем, т. е. систем, в которых человек-оператор является неотъемлемым функциональным звеном, конкретные виды количественных характеристик надежности определяются типом систем «человек—машина». По распределению функций между человеком и техникой эти системы могут быть следующих типов:

1) достижение цели осуществляется только техническими устройствами (на человека возлагаются лишь функции по восстановлению аппаратуры в случае ее отказа);

2) достижение цели возможно только техническими устройствами или только человеком (порознь); в основном режиме цель достигается техническими устройствами, а в случае ее отказа — человеком;

3) достижение цели может быть осуществлено только при совместной работе технических устройств и человека.

Для каждого из перечисленных типов характеристики надежности раз-

личны. Так, для первого типа — это характеристики, используемые в теории надежности технических средств для восстанавливаемых систем. Для второго типа — это характеристики дублированной системы, одним из звеньев которой является техническое звено, а вторым — человек. Для третьего типа необходимо вводить новые более детальные надежность характеристики отдельных операций деятельности человека и используемых при этом участков технических средств, на основании которых затем вычислять вероятность выполнения задания или достижения цели.

Последний случай наиболее общий. Таким образом, под расчетом надежности комплекса «человек—машина» понимается расчет вероятности выполнения задания (достижение цели) комплексом в целом.

Расчеты надежности комплексов «человек—машина» по их назначению можно разделить на несколько групп.

1) нормативные (цель — определение предельно допустимой величины показателя надежности);

2) оценочные (определение фактической величины показателя надежности), которые делятся, в свою очередь, на сравнительные — сравнение между собой различных вариантов структур деятельности человека и параметрические — выявление влияния отдельных параметров при одной и той же структуре деятельности человека;

3) проверочные (определение фактической величины показателя надежности для сравнения его с установленными нормами).

Основным рабочим видом расчетов являются оценочные расчеты, при помощи которых можно получить необходимую информацию для принятия решений при проектировании, даже когда нет еще полностью достоверных данных по исходным показателям структуры и условиям длительности и т. д.

По аналогии с расчетами надежности технических средств расчеты надежности комплексов «человек—машина» по степени достоверности можно разделить на следующие виды:

1) прикидочные расчеты, при которых исходными данными по временным и надежностным характеристикам отдельных операций принимаются некоторые осредненные данные;

2) ориентировочные расчеты, при которых исходными данными по временным и надежностным характеристикам отдельных операций принимаются данные, соответствующие конкретным типам аппаратуры;

3) полные (или окончательные) расчеты, при которых учитываются реальные режимы работы, условия труда и отдыха.

Для выполнения таких расчетов необходимо располагать зависимостями временных и надежностных характеристик от указанных факторов.

Обязательное условие эффективности количественных оценок надежности — достаточная точность и достоверность их. Точность и достоверность расчета показателей надежности систем «человек—машина» зависят:

— от точности и достоверности исходных данных надежности технических средств и человека;

— от точности сведений об условиях работы элементов технических средств и человека в реальной обстановке;

— от методологических ошибок, характеризующих точность связи исходных показателей надежности с расчетными;

— от методических ошибок, характеризующих точность пересчета исходных показателей надежности элементов технических средств и человека от одних условий к другим.

Расчетные методы определения показателей надежности систем «человек — машина» имеют, как правило, более низкую точность, чем экспериментальные, но они могут использоваться уже на ранних стадиях проектирования.

При определении надежности человека необходимо исходить из того, что он, как правило, представляет собой в комплексе многофункциональную социально-биологическую систему и потому оценить его одной харак-

теристикой надежности в принципе невозможно. Для учета различных свойств человека необходимо различать:

— психологическую надежность (Ψ-надежность), учитывающую только временные неустойчивые отказы (ошибки в деятельности);

— физиологическую надежность (Ф-надежность), учитывающую только временные устойчивые отказы, сопровождающиеся временной потерей возможности дальнейшего выполнения предписанных ему функций;

— демографическую надежность (Δ-надежность), учитывающую только окончательные отказы человека, сопровождающиеся полной и безвозвратной потерей возможности дальнейшего выполнения предписанных ему функций.

Чтобы перейти от общих понятий надежности человека к конкретным значениям, необходимо:

— для Ψ-надежности — задать структуру деятельности человека;

— для Ф и Δ-надежности — задать социально-демографические условия.

Учитывая, что при оценке Ф- и Δ-надежности применимы обычные методы, разработанные в теории надежности технических средств, так как в этих случаях человек отказывает в целом, может быть предложена следующая методика количественной оценки надежности системы «человек—машина», в которой учитываются только временные неустойчивые отказы в деятельности человека.

1. Логический анализ или опрос проектировщиков выявляет режимы работы комплекса «человек—техника». При этом все режимы для дальнейшего анализа разделяются на основные, вспомогательные и аварийные. Каждой группе режимов работы соответствуют свои функции управления, которые реализуются при выполнении той или иной задачи.

2. Для каждого режима работы определяют задачи, решаемые человеком.

3. Для каждой задачи составляют алгоритм деятельности человека в описательной форме. В соответствии со стадией проектирования такой алгоритм может быть записан либо на основании предыдущего опыта проектирования комплексов с подобной степенью автоматизации, либо на основании инструкции по эксплуатации данного комплекса.

4. Согласуют алгоритм работы с условиями деятельности оператора за пультом.

5. Производят формализованную запись алгоритма на уровне функциональной единицы, для чего в алгоритме необходимо выявить:

а) рабочие блоки, т. е. блоки, при невыполнении любого из которых, даже при идеально надежной технике, цель не будет достигнута;

б) диагностические блоки, т. е. блоки, целью которых является контроль исправности технических средств, используемых при выполнении рабочих блоков;

в) блоки самоконтроля, т. е. блоки, целью которых является контроль безошибочности выполнения предшествующих рабочих блоков.

6. Составляют структуру на уровне оперативных единиц, для которых могут быть заданы количественные характеристики.

7. Назначают числовые значения количественных характеристик на каждую оперативную единицу и подсчитывают их для функциональных единиц.

8. В последовательности выполнения блоков выявляют некоторые типовые комплексы. В последовательности выполнения блоков всегда можно выявить те или иные повторяющиеся сочетания рабочих блоков и блоков контроля. Подобные сочетания будем называть типовыми комплексами блоков операций.

9. Подсчитывают количественное значение вероятности выполнения задачи. Составленные исходные структуры и найденные для их блоков числовые характеристики (надежностные и временные) позволяют по критерию — вероятность выполнения задачи — оценить надежность комплекса

«человек—техника» при выполнении им задач, выявленных в процессе анализа его функционирования.

Вероятность выполнения задачи $P_{вз}$ определяется как произведение вероятностей безошибочного и своевременного ее выполнения:

$$P_{вз} = P_б \cdot P_c,$$

где $P_б$ — вероятность безошибочного выполнения задачи;
 $P_c [t < T_д]$ — вероятность своевременного выполнения задачи;
 t — время выполнения задачи;
 $T_д$ — допустимое время выполнения задачи.

Вероятность своевременного выполнения задачи P_c определяется исходя из того, что в качестве предельного закона распределения случайной величины затрачиваемого времени на решение задачи может быть принято гамма-распределение, плотность распределения которого имеет вид:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0 \\ \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \beta^\alpha t^{\alpha-1} e^{-\beta t} & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

а параметры распределения выражаются через моменты следующим образом:

$$\alpha = \frac{M^2(T)}{D(T)} \quad \beta = \frac{M(T)}{D(T)};$$

где $M(T)$ — математическое ожидание времени, затрачиваемого на решение задачи;

$D(T)$ — дисперсия времени решения задачи.

Подсчитав значения α и β и используя таблицы справочной литературы, строим функцию $P(t)$. Зная же допустимое время выполнения задачи $T_д$, определяем вероятность своевременного ее выполнения: $P_c [t < T_д]$.

Изложенный метод оценки надежности деятельности человека в информационно-управляющих системах позволяет уже на этапах проектирования таких систем ввести количественный критерий, учитывающий работу техники и человека. Точность количественной оценки зависит от этапа проектирования, в то время как принципы расчета остаются неизменными. Метод количественной оценки надежности позволяет сравнивать различные варианты систем в целом или отдельных устройств.

Аналитические методы оценки показателей надежности и эффективности позволяют учитывать в явном виде влияние на функционирование системы отдельных ее параметров и элементов. Однако существенными недостатками аналитических методов являются громоздкость и частный характер решения. В связи с этим возникает актуальная проблема разработки обобщенных подходов, универсальных вычислительных схем и отдельных программ (подпрограмм), существенно облегчающих и ускоряющих построение моделей для исследования надежности и эффективности функционирования сложных систем определенных классов.

Методы математического и физического моделирования, натуральных и сопряженных испытаний позволяют тем или иным способом отобразить или воспроизвести действительность для изучения заложенных в модели объективных закономерностей. В частности, в плане исследования надежности и эффективности проектируемой аппаратуры можно выделить два основных направления применения методов моделирования:

1. Моделирование явлений вне технических систем (при эксплуатации последних), включающее:

— моделирование процессов обслуживания с учетом различного рода отказов, динамики обеспечения системы ремонтными бригадами и ЗИП и т. п.;

— моделирование условий функционирования и реакции системы на детерминированные и случайные внешние воздействия,

2. Моделирование явлений внутри технических систем при их эксплуатации, связанное с воспроизведением процессов возникновения отказа, исследованием их последствий и прогнозированием надежности.

Численные методы, ориентированные на использование вычислительной техники, дают возможность реализовать математическую модель при конкретных значениях аргументов (детерминированно или стохастически определенных). Соответствующий алгоритм позволяет имитировать поведение элементов системы и взаимодействие между ними, учитывая при этом случайные возмущающие факторы.

При оценке функциональных показателей эффективности методом статистических испытаний на вход системы или ее модели подаются множества сигналов, полученных путем моделирования. Каждая реализация входных сигналов выбирается на основании жребия в соответствии с вероятностью своего появления. При этом оценку функциональных показателей эффективности следует проводить методом последовательного анализа, что позволяет существенно сократить объем моделирования. Применение метода статистических испытаний позволяет завершить оценку эффективности функционирования практическими результатами, обеспечить необходимый доверительный интервал.

Однако оценке функциональных показателей эффективности методом статистических испытаний сопутствуют следующие трудности: при достаточно малом доверительном интервале и высокой доверительной вероятности может потребоваться большое число испытаний; при реализации моделей могут возникнуть затруднения, обусловленные сложностью исследуемых систем, приводящей к существенному усложнению алгоритма моделирования; отсутствует возможность учета в явном виде влияния стохастических, структурных и динамических свойств системы на значения ее функциональных показателей надежности и эффективности.

Для оценки функциональных показателей эффективности методом натуральных испытаний на вход системы подается множество сигналов, поступающих от реальных объектов больших систем. При использовании метода натуральных испытаний не встречаются трудности, характерные для метода моделирования, вследствие чего оценки функциональных показателей эффективности свободны от объективных факторов. Однако метод натуральных испытаний обычно связан с большими затратами, поэтому его целесообразно использовать только в целях оценки эффективности моделей объектов сложных систем, а также для уточнения оценок функциональных показателей эффективности.

Теория подобия и физического моделирования позволяет с помощью обобщенных параметров и относительных переменных распространить результаты численного анализа и натуральных экспериментов для одного явления на характеристики группы подобных явлений. Однако реализация методов физического моделирования встречает определенные трудности при исследовании процессов со стохастическими определенными параметрами и входными переменными.

Ограниченность существующих физических и математических моделей требует совершенствования методов исследования процессов функционирования разрабатываемых систем. Возникает задача организации комплексных экспериментов, представляющих собой сочетание натуральных экспериментов на отдельных элементах сложной системы, метода статистических испытаний, методов физического моделирования.

Метод сопряженных испытаний представляет собой сочетание методов статистических и натуральных испытаний. Характерной особенностью оценки функциональных показателей эффективности методом сопряженных испытаний является то, что на вход этих систем или их моделей подаются множества сигналов, частично полученных путем моделирования, частично поступающих от реальных объектов. В остальном оценка функциональных показателей эффективности методом сопряженных испытаний производится таким же образом, как и методом статистических и натуральных испытаний.

Преимущества метода сопряженных испытаний заключаются в следующем: он связан с меньшим, чем метод статистических испытаний, объемом моделирования, в связи с чем оценка функциональных показателей эффективности более объективна; требует привлечения меньшего числа реальных элементов больших систем для оценки функциональных показателей эффективности, чем метод натурных испытаний. Оценка функциональных показателей обходится обычно дороже, чем при применении метода статистических испытаний и носит менее объективный характер, чем при применении метода натурных испытаний. При соответствующих соотношениях статистических и натурных испытаний можно добиться большей объективности оценок функциональных показателей эффективности при приемлемых материальных затратах и, наоборот, меньших материальных затрат при приемлемой объективности этих оценок. Из сказанного следует, что метод сопряженных испытаний целесообразно применять только для уточнения моделей отдельных элементов больших систем, а также оценок некоторых функциональных показателей надежности и эффективности.

Комбинированный метод оценки функциональных показателей эффективности представляет собой сочетание аналитического метода с методом испытаний. При этом можно различать следующие виды комбинированного метода оценки: сочетание аналитического метода с методом статистических испытаний; сочетание аналитического метода с методом натурных испытаний; сочетание аналитического метода с методом сопряженных испытаний.

Сочетание аналитического метода с методом статистических испытаний предполагает проведение статистической оценки отдельных частей аналитических выражений функциональных показателей эффективности. Далее эти оценки используются для окончательного вычисления значений функциональных показателей эффективности по соответствующим аналитическим выражениям. Соотношение между аналитическим методом и методом статистических испытаний в каждом конкретном случае устанавливается отдельно. При этом необходимо учитывать цель исследования, сложность аналитических выражений функциональных показателей эффективности и имеющиеся реальные возможности вычислительных средств. В отличие от метода статистических испытаний соответствующее соотношение между аналитическим методом и методом статистических испытаний позволяет в некоторой мере учесть влияние стохастических, структурных и динамических свойств системы на эффективность функционирования и в явном виде. Однако при оценке функциональных показателей эффективности путем сочетания аналитического метода с методом статистических испытаний имеют место следующие недостатки: для достаточно малых доверительных интервалов и высоких доверительных вероятностей может потребоваться большее число экспериментов, чем при применении только метода статистических испытаний; как и в случае применения метода статистических испытаний, могут встретиться большие трудности моделирования, а также связанная с ними значительная субъективность оценки; могут встретиться препятствия, аналогичные тем, которые ограничивают практическую приемлемость аналитических выражений функциональных показателей эффективности.

При сочетании аналитического метода с методом натурных испытаний отдельные части явных аналитических выражений функциональных показателей эффективности оцениваются методом натурных испытаний. Однако сочетание аналитического метода с методом натурных испытаний обычно требует больших экономических затрат, чем сочетание аналитического метода с методом статистических испытаний. Поэтому к нему целесообразно прибегать только в целях синтеза и оценки качества моделей объектов больших систем, а также уточнения оценок функциональных показателей эффективности с частичным явным учетом влияния их стохастических, структурных и динамических свойств.

Основная особенность сочетания аналитического метода с методом сопряженных испытаний заключается в том, что отдельные части аналити-

ческих выражений функциональных показателей эффективности оцениваются методом сопряженных испытаний. После этого полученные оценки используются для окончательного вычисления функциональных показателей эффективности по соответствующим аналитическим выражениям. Преимущества сочетания аналитического метода с методом сопряженных испытаний заключаются в следующем: необходимый объем моделирования меньше, чем при сочетании аналитического метода с методом статистических испытаний, поэтому оценки функциональных показателей носят более объективный характер; число реальных объектов больших систем, привлекаемых для оценки функциональных показателей эффективности, меньше, чем при сочетании аналитического метода с методом натуральных испытаний, поэтому реализация метода обычно дешевле. К недостаткам сочетания аналитического метода с методом сопряженных испытаний можно отнести следующие: оценки функциональных показателей эффективности, как правило, обходятся дороже, чем при сочетании аналитического метода с методом статистических испытаний; оценка носит менее объективный характер, чем при сочетании аналитического метода с методом натуральных испытаний.

Сочетание аналитического метода с методом натуральных испытаний следует применять только для уточнения моделей отдельных элементов больших систем, а также оценок некоторых функциональных показателей эффективности с частичным явным учетом их стохастических, структурных и динамических свойств.

ПРОЕКТИРОВЩИКИ «БОРЮТСЯ» ЗА НАДЕЖНОСТЬ

При разработке самых разнообразных технических систем перед проектировщиками неизменно стоят одни и те же проблемы, определяющие специфику современного проектирования. Прежде всего сложность таких систем и постоянное увеличение стоимости их разработки. Повышенная сложность влечет за собой удлинение сроков проектировочных работ, что, в свою очередь, входит в противоречие с тенденциями к сокращению сроков морального старения технических достижений. Ну и, конечно, особое место занимает «человеческий фактор», т. е. вопросы взаимодействия человека и машины. Учитывая названные трудности, разработчикам можно рекомендовать использовать при проектировании комплексный системный подход рассмотрения различных характеристик проектируемых изделий.

Требования, предъявляемые к системе, зачастую противоречивы. Например, необходимо обеспечить ее высокую надежность и одновременно снизить затраты на проектирование и производство. Следовательно, конструктор вынужден искать компромиссные решения. Это и обуславливает необходимость комплексного подхода к разработке, поскольку изолированное, оторванное от общих взаимосвязей решение отдельных задач не может дать удовлетворительного компромиссного решения.

Весьма значим для проектантов выбор оптимального варианта развития в условиях ограниченных ресурсов. Оптимальное решение в данном случае возможно при сравнении альтернативных вариантов по некоторому интегральному показателю наибольшей информативности. Такой обобщенный показатель — **эффективность системы** (степень ее соответствия своему назначению).

Оценка эффективности сложных систем как раз и базируется на комплексном подходе к проектированию, учитывающем и технические и экономические аспекты.

Системы «зарождаются», претерпевают ряд этапов развития, преобразования и становления, эксплуатируются и, постепенно утрачивая свои свойства, перестают «существовать». На разных этапах развития они требуют разных «затрат», приносят разный «доход» и обладают разной эффективностью. Поэтому качество системы можно определить **интегральной эффективностью** за период от начала разработки до выхода ее из строя.

При определении интегральной эффективности необходимы сведения о длительности отдельных этапов развития системы. Если начало проектирования может быть установлено точно, то определение момента прекращения ее деятельности достаточно сложно, поскольку здесь основное влияние оказывают внешние факторы, не связанные непосредственно со структурой системы. Поэтому прогноз времени прекращения применения системы может быть сделан лишь с некоторой вероятностью.

В зависимости от целей, назначения и подхода к определению эффективности системы находят применение критерии:

— качества функционирования, охватывающие ограниченную совокупность технических и тактических характеристик сложных систем;

— статистические, частично учитывающие также и экономические показатели системы;

— «качество — стоимость», учитывающие качество функционирования, вероятностные характеристики, стоимости ошибок и стоимости самой системы в различных вариантах конструктивно-технологической реализации и эксплуатационных режимов (использование таких критериев позволяет реализовать методы теории статистических решений и теории игр, более полно учесть экономические эффекты);

— «качество — стоимость — время»; необходимы для комплексной оценки эффективности сложных систем на различных этапах их разработки и эксплуатации (функция эффективности в этом случае составляется с учетом технических, вероятностных, стоимостных и временных характеристик системы).

Критерии «качество—стоимость» и «качество—стоимость—время» широко распространены при оценке различных проектов и выборе оптимальных вариантов сложных технических систем.

Оценка эффективности разрабатываемых систем не может быть единовременной: определение эффективности системы должно быть динамичным, приспособляющимся к ситуации. Такая оценка эффективности позволяет более точно определить «время жизни» системы и правильно установить сроки модернизации существующего или разработки нового, более совершенного варианта.

Для так называемых «бесприбыльных» систем (например, военного назначения, обеспечения безопасности эксплуатации) вводят аналог понятия «прибыль». Это дает возможность в достаточной мере условно использовать понятие о «прибыльности» тех или иных неприбыльных систем, что в ряде случаев позволяет применить к ним общие методики анализа.

В современном проектировании успех разработки во многом определяется способностью руководителя согласовать направления работ и интересы отдельных групп разработчиков. Это обусловило появление систем управления проектированием и экспериментальной отработкой, основу которых составляют автоматизированные системы сбора и обработки научно-технической, экономической и административно-управленческой информации.

Оперативная информация о ходе работы над проектом обеспечивает аппарат главного конструктора сведениями, необходимыми для эффективного распределения сил и средств, что позволяет использовать методы научно обоснованного планирования работ и прогнозирования сроков завершения отдельных этапов по их фактическому состоянию. Информация поступает от руководителей отдельных направлений разработки и обрабатывается аппаратом главного конструктора по подготовленному комплексу программ. Поступление информации и ее обработка разделены по месту и времени: разработчики вводят информацию в вычислительную машину по линиям связи; информация хранится в машине и обрабатывается аппаратом главного конструктора по мере необходимости. В экстренных случаях предусматривается возможность запросить мнение главного конструктора либо через вычислительную машину, либо с помощью обычных средств связи.

От автоматизации управления проектными работами необходимо перейти к автоматизации самих этих работ, чтобы существенно сократить срок проектирования. Основу автоматизированной системы проектирования составляет современная ЭЦВМ, помимо прочего, снабженная специальным комплексным математическим обеспечением, учитывающим специфику проектно-конструкторских работ. Вычислительная машина должна допускать работу в режимах разделения времени, объединение с малыми цифровыми и аналоговыми вычислительными средствами.

В комплект средств технического обеспечения входят устройства оперативного отображения графической информации, ее ввода и вывода, размножения, а также специальный пульт управления, который позволяет проектировщикам обмениваться с системой оперативной информацией с помощью специального сервисного языка проектирования.

Ввод и вывод графической информации — процесс более

медленный по сравнению с ее оперативным отображением, что предъявляет особые требования к организации математического обеспечения. При разработке его алгоритмов и программ целесообразно максимально использовать комплекс математического обеспечения центрального вычислителя. Сюда можно отнести трансляторы с алгоритмических языков, программу управления работой внешних устройств, интерпретирующие, компилирующие программы и т. д.

Отсутствие формализованных критериев оценки качества проектирования как больших технических средств, так и их отдельных элементов не позволяет создать замкнутой внутри системы схемы проектирования. Наиболее реально построение систем автоматизации проектирования по принципу «человек—машина». Следовательно, существенный момент разработки математического обеспечения — вопросы диалога «человек — система».

Как средство общения конструктора с системой может быть использован один из алгоритмических языков математического обеспечения центрального вычислителя, но это значительно сужает круг потенциальных пользователей системы или предполагает наличие между нею и конструктором дополнительного звена (оператор-программист). Указанное обстоятельство заставляет создавать специализированные внешние языки (сервисный, информационный).

Сервисный язык позволяет вести диалог «человек—система» с помощью отдельных приказов и программ. Его отличают:

- алгоритмичность (позволяет проектировщику строить различные последовательности функциональных операций);

- возможность использовать в программах вставки на других языках, предусмотренных в системе автоматизации программирования;

- гибкость (делает возможным при необходимости расширения функциональных свойств системы описывать их существующим набором средств языка);

- простота и доступность;

- однозначность синтаксических выражений;

- возможность дополнять и изменять начальное количество идентификаторов.

Информационные языки служат для ввода специальных видов конструкторско-технологической информации (описание чертежей и геометрических тел). Информационные языки должны быть:

- аналогичными конструкторским средствам отображения информации;

- простыми и доступными;

- наглядными (должна соблюдаться идентичность языковых и геометрических форм описания);

— полными, т. е. достаточными для описания необходимой информации.

Разработка вышеупомянутых языков необходима при создании специализированных систем и относится к внешнему математическому обеспечению системы. Специализированные языки делают ее доступной широкому кругу потребителей.

Но если есть специализированные языки, следовательно, нужны и трансляторы для перевода информации с языкового описания на внутрисистемное представление. Транслятор обеспечивает преобразование программ и отдельных приказов на сервисном языке в форму, удобную для использования в данной машине, выполняя при этом следующие основные функции:

- распознавание исходной программы различных составляющих входного языка;
- анализ структуры программы на сервисном языке;
- установление связи между используемыми идентификаторами и их описаниями;
- использование рабочей программы для вычислений, определенных текстом на сервисном языке.

Транслятор должен иметь средства для отладки программы на сервисном языке.

Для функционирования системы используются программы физических расчетов, геометрических преобразований и управляющие программы. Программы физических расчетов обеспечивают расчеты, которые определяют область применения системы. В конкретном случае применения ее для автоматизации процессов проектирования данные программы обеспечивают весь комплекс вычислений и расчетов, необходимых при создании проектов больших технических средств.

Программы геометрических преобразований относятся к чисто системному программному математическому обеспечению и разделяются на программы обеспечения оперативных устройств графического отображения и обеспечения медленно действующих устройств графического отображения.

Управляющая программа системы — как бы связующее звено математического аппарата автоматизированной системы проектирования, она обеспечивает выполнение программ и приказов конструктора. Управляющая программа может приостановить вычислительный процесс по приказу конструктора, выдает информационно-справочные материалы для вычислений, взаимодействует с операционной системой центрального вычислителя, обеспечивает выдачу пояснений конструктору, информирует его о состоянии процесса проектирования на текущий момент времени, позволяет изменять и корректировать информационные массивы и программы, реа-

лизует работу устройств отображения графической информации.

Программа допускает работу системы в режиме «вопросов—ответов» и в программном режиме. Режим «вопросов—ответов» дает возможность получить требуемые конструктором оперативные результаты, а программный режим — провести комплекс необходимых расчетов проектирования.

В математическом обеспечении предусматривается решение несистемных задач, если свободен центральный вычислитель (другими словами, можно работать на нескольких пультах центрального вычислителя одновременно).

Информационная подсистема позволяет:

— выдавать необходимые информационно-справочные данные о состоянии архивной библиотеки: информационно-конструкторскую информацию (чертежи общих видов, детализации и т. п.); текстовую документацию;

— обеспечивать информацией компилирование отдельных фрагментов геометрического изображения;

— подсчитывать некоторые статистические показатели по отдельному классу объектов;

— изменять и корректировать информационные массивы;

— совершенствовать библиотеку в процессе эксплуатации системы на основании статистической обработки.

Все сказанное выше, а именно переход к комплексному управлению системами проектирования и экспериментальной отработки опытных изделий во многом определяется развитием методов научного эксперимента. Современный научный эксперимент — это сложная последовательность взаимосвязанных опытов для получения большого объема научных сведений. В связи с существенным возрастанием информационной емкости объектов исследований и повышением требований к качеству информации возникает необходимость организации специальных кибернетических систем для автоматизации сбора и обработки экспериментальной информации и управления научными экспериментами.

При всем разнообразии экспериментальных исследований для всех подобных экспериментов существует ряд общих трудностей, связанных с обеспечением многократной повторяемости одного и того же цикла исследований при идентичных начальных условиях, с измерением и регистрацией большого числа величин, с высокой точностью и обработкой полученных результатов. Поэтому для любых исследований можно выделить три общие задачи:

— автоматизация проведения экспериментов;

— автоматизация измерения и регистрации результатов

— автоматизация обработки данных.

Другой аспект проблемы научного эксперимента — его на-

дежность, под которой понимается полнота экспериментальных данных. Для уменьшения риска потери информации экспериментатор обычно склонен иметь избыток первичных экспериментальных данных, ибо зачастую ему неизвестен их минимально необходимый объем. Следовательно, повышение информационной надежности эксперимента достигается увеличением его информационной избыточности. Если с точки зрения надежности эксперимента такая избыточность и может быть оправдана, то для дальнейшей обработки данных она нежелательна, поскольку приводит к существенному увеличению времени обработки данных и повышению стоимости всего экспериментального цикла.

Уже применение простых самопишущих и цифропечатающих приборов означает какую-то степень автоматизации и освобождает научного работника от сбора огромной массы экспериментальных данных. Но при этом остаются ручные методы проверки и калибровки приборов, установления шкал, считывания зарегистрированных данных, их обработки и управления ходом эксперимента, причем перечисленные процессы могут быть более трудоемкими и занимать больше времени, чем сама регистрация данных.

Специализированные устройства на некотором этапе могут улучшить автоматизацию экспериментальных работ, но при возрастании объема и сложности лабораторных исследований они становятся громоздкими и дорогими и быстро перестают удовлетворять экспериментатора. В настоящее время серьезно ставится вопрос о создании систем автоматизированных экспериментов, в которых задача сбора данных и управления экспериментом выполняется ЭЦВМ. На сегодня управляющие вычислительные машины в основном ориентированы на управление производственными процессами. Однако в научных экспериментах есть некоторая специфика; соответственно должна отличаться и управляющая машина.

Производственные процессы характеризуются сравнительно большой стабильностью во времени алгоритма управления, поэтому управляющая машина может с успехом длительно применяться для управления производством без частого изменения программ. Для научных исследований, напротив, типична быстрая смена задач и алгоритмов, от управляющей машины при автоматизации научных исследований требуется большая гибкость в перестройке внешних устройств для подключения к экспериментальной установке и развитая система «прерываний» в ходе эксперимента для обработки получаемых данных и вывода промежуточных результатов. Успешное применение ЭЦВМ для автоматизации в данном случае существенно зависит от легкости составления программы самим экспериментатором, т. е. входной язык должен быть сравнительно простым. Существующие вычислительные ма-

шины, как правило, не имеют таких качеств, поэтому их использование связано с большими трудностями.

Пока нет ЭЦВМ с достаточно большими скоростями вычислений и ввода данных, с развитой системой внешних устройств и устройств связи с объектом, приходится ориентироваться на имеющиеся машины. В связи с этим в настоящее время автоматизация научных экспериментов (в зависимости от сложности эксперимента и доступности ЭЦВМ для экспериментатора) может идти по двум путям:

— автоматизация экспериментальной работы с применением управляющей ЭЦВМ в реальном времени;

— регистрация результатов измерений во время эксперимента обязательно в машинно-читаемом виде на каком-либо носителе, пригодном для ввода в ЭЦВМ без дополнительной подготовки, для последующей обработки экспериментальных данных.

Если вычислительная машина недоступна экспериментатору для работы в реальном времени или эксперимент сравнительно длинный (т. е. невелика скорость поступления полученных данных), то целесообразно использовать для последующей передачи на вычислительную машину предварительную регистрацию результатов измерений.

Следует подчеркнуть, что обычно цель эксперимента в получении исчерпывающей информации о неизвестном явлении. При полной автоматизации результаты обработки, выдаваемые машиной, могут скрыть от человека ряд тонкостей, присущих исследуемому явлению и необходимых для решающего (иногда неожиданного) вывода. Это требует активного участия человека в работе системы автоматизации и организации обмена информацией между человеком и машиной.

Особенностью научных исследований является то, что линия поведения экспериментатора не всегда может быть четко определена до начала опыта или выполнения некоторых этапов обработки. Средства ввода исходных данных и получения результатов обработки при автоматизации научных исследований должны обеспечивать оператору свободу действий и быть развиты гораздо шире, чем при автоматизации производственных процессов. Необходима гибкая система отображения, дающая возможность сопоставлять промежуточные и окончательные результаты в разных вариантах.

Важная задача при автоматизации научного эксперимента — обеспечение исследователя широким набором методов и технических средств обработки исходных данных и представления результатов исследования в удобном для исследователя виде. Такой набор в идеале должен позволить исследователю получать результаты в любом формально допустимом виде, производить над ними любое преобразование и выбрать наиболее приемлемую форму их представления.

При выводе из ЭЦВМ результатов исследований можно выделить два этапа. На первом важно иметь большую скорость вывода и изменения информации, простоту редактирования и выбора способа отображения данных. На втором, по окончании творческого процесса исследования, главное требование к выводу информации заключается в качестве оформления (точность, сглаживание случайных ошибок на графиках, наглядность представления результатов, необходимый формат, координатная сетка, подписи и размеры и т. д.) Выработанная машиной информация должна быть пригодна без всякой дополнительной обработки для публикации либо для пользования в качестве основной технической документации.

На первом этапе в основном используется аппаратура вывода на электроннолучевую трубку (ЭЛТ) с алфавитно-цифровой клавиатурой и устройствами ввода типа «световое перо» либо «электропланшет».

Второй этап — двухкоординатные шаговые графопостроители и дискретношаговые устройства на прецизионных ЭЛТ с кино- или фотосъемкой. Весьма важно, что в данном случае появляется возможность формирования движущихся изображений, что позволяет наблюдать обобщенные характеристики исследуемого явления в динамике. Результаты эксперимента могут быть зафиксированы в виде кинофильма в желаемом масштабе времени. Психологический эффект такого обозримого представления пока даже трудно оценить. Совершенно очевидно, что появляется реальная, технически осуществимая возможность хотя бы частичной автоматизации творческого умственного труда, замены воображения непосредственным восприятием.

Важный аспект автоматизации экспериментальных исследований — создание комплексных натурно-моделирующих экспериментальных стендов для отработки проектируемых систем. Применение таких стендов с элементами реальной аппаратуры сокращает сроки и снижает стоимость заключительных этапов создания системы, позволяет приблизить результаты исследования лабораторных систем к результатам натурных испытаний.

Моделирование в реальном времени, необходимое при работе с реальной аппаратурой, затруднительно на существующих ЭЦВМ вследствие недостаточного быстродействия, а на аналоговых машинах — из-за малой точности. Очевидно, следует искать пути их совместного использования: в настоящее время все большее распространение получают аналого-цифровые моделирующие комплексы.

Основная характеристика модели — точность описания системы и надежность работы. Точность описания зависит от этапа разработки, соответственно должны определяться цели и методы моделирования, структура модели. Опыт построения

и исследования моделей некоторых проектируемых систем показывает, что целесообразно выделять следующие этапы комплексного моделирования.

1. Приближенное математическое моделирование системы в целом. Составляется грубая математическая модель системы, которая реализуется на аналого-цифровой части комплекса. На модели исследуются приближенные структурные схемы системы, определяется более или менее оптимальный состав входящей в нее аппаратуры.

2. Уточненное математическое моделирование для определения требований к подсистемам, блокам и узлам.

3. Полунатурное моделирование. Группы дифференциальных уравнений, описывающих поведение отдельных подсистем, блоков и элементов, заменяются реальными элементами по мере их изготовления. Реальная аппаратура стыкуется, и вся система отлаживается. В контур управления включается человек-оператор, происходит отработка всей системы в целом в лабораторных условиях. Моделирование ведется в реальном времени.

4. Точное математическое моделирование. По результатам полунатурного моделирования уточняется математическая модель. Исследуются вопросы точности и эффективности. Определяется измерительный комплекс будущих натуральных испытаний, вносятся коррективы в их программу. Модель сохраняется до конца натуральных испытаний.

На первом и втором этапах выбирается оптимальная структура системы и определяются требования к параметрам подсистем — блокам и узлам. На третьем включаются элементы и блоки реальной аппаратуры в различных тактических вариантах, что позволяет получать результаты, близко соответствующие результатам натуральных испытаний. Поэтому натурные испытания можно сократить до минимума. Четвертый этап позволяет судить об эффективности системы.

Использование аналого-цифрового моделирующего комплекса означает качественно новый подход к проектированию сложных систем, что позволяет в конечном итоге провести эту работу на высоком научно-техническом уровне, в кратчайшие сроки и с наименьшими экономическими затратами. Таким образом комплексное моделирование изменяет содержание работ по функционально-структурному проектированию.

Аналого-цифровой моделирующий комплекс должен состоять из следующих основных частей: универсальной ЭЦВМ; аналоговой вычислительной машины; переходного устройства (преобразователей аналог-цифра, цифра-аналог с системой управления); динамических стендов и нагрузочных устройств; центрального пульта управления. Вычислительная нагрузка распределяется между ЭЦВМ и аналоговой машиной. Систе-

ма уравнений делится на две части — точную и грубую, которые решаются на соответствующих машинах.

Многоканальное переходное устройство обеспечивает совместную работу цифровой и аналоговой вычислительных машин на всех этапах. Динамические системы и нагрузочные устройства позволяют включать при моделировании часть реальной аппаратуры и создавать нагрузки, эквивалентные реальным. Центральный пульт дает возможность управлять всем комплексом, подавать команды на одновременное включение и выключение всей задействованной аппаратуры и проводить наблюдение и регистрацию решения.

Строго говоря, применительно к исследованию управляющих алгоритмических структур не принципиально, поступает ли поток входной информации от реальных объектов или имитируется программно на ЭЦВМ, если только совпадают входные такты и каналы. Это позволяет в ряде случаев ограничить задачу построения модели потоков входной информации от обслуживаемых объектов: можно не моделировать процесс функционирования ряда реальных объектов — датчиков входной информации — во всех деталях; важно только, чтобы с их помощью можно было на входе модели создать диапазон требуемых условий.

В общем случае испытательно-моделирующий комплекс с физическими и математическими моделями отдельных элементов (подсистем) сложной системы должен обеспечивать:

— моделирование воздействий внешней среды во всем диапазоне возможных значений с наложением стохастических составляющих;

— работу стенда в реальном времени в случаях, когда при моделировании используются реальные элементы системы, и в машинном масштабе времени, когда объекты системы не используются;

— возможность поэтапной оценки качества функционирования, а также использования стенда не только для получения оценок качества функционирования, но и для других целей (отладка управляющих программ, получение характеристик эффективности вмешательства оператора в процесс управления, исследовательских работ, в качестве тренажера для операторов и обслуживающего систему персонала и т. п.);

— синхронизацию имитированной входной информации с временной диаграммой функционирования испытываемой системы;

— требуемую точность и достоверность результатов моделирования;

— возможность имитации единичных отказов отдельных элементов и произвольных сочетаний отказов любого числа различных элементов.

Создание такого комплекса требует больших материаль-

ных затрат, поэтому особое внимание необходимо уделять его максимальной загрузке. Смена программ на ЭЦВМ осуществляется легко, а для аналоговой машины и реальной аппаратуры такой процесс занимает длительное время. Практически набранная и отлаженная на аналоговой машине задача не разбирается до конца всей работы. Поэтому наличие в комплексе нескольких аналоговых машин, динамических стендов и нагрузочных устройств позволяет вести разработку одновременно нескольких систем.

При разработке стенда необходимо предусмотреть его автоматизацию и отображение результатов на соответствующих индикационных устройствах. Специальное устройство ввода информации в ЭЦВМ с широко применяемыми при натуральных испытаниях магнитными накопителями позволяет автоматизировать обработку результатов, что значительно ускоряет проведение испытаний и обеспечивает дополнительную загрузку машины.

Выше много говорилось о специфике использования вычислительной техники при разработке и проектировании систем. Как же повысить эффективность вычислительных машин в процессе проектирования? Прежде всего следует решить проблему так называемого «психологического барьера». Дело в том, что специалисты в конкретных областях нередко слабо владеют существующими вычислительными средствами и современным математическим аппаратом. В результате инженерно-технические работники избегают математических экспериментов на вычислительных машинах и пользуются «традиционными» методами проб и испытаний, т. е. непосредственно физическим макетированием на всех этапах разработки. Если такой метод проектирования в какой-то мере допустим при разработке автономных технических средств, то для создания комплексных систем он принципиально неприемлем: отсутствие математического эксперимента значительно удорожает и затягивает сроки разработки оборудования, приводит к длительным и дорогостоящим доводочным испытаниям.

На успех в применении ЭЦВМ можно рассчитывать в том случае, если проектировщик не только знаком с основами вычислительной техники, но и имеет доступ к машине в любое время. Такая организация работ возможна при использовании систем разделенного времени ЭЦВМ и наличии выносных пультов непосредственно в проектных и производственных подразделениях.

Другой аспект повышения эффективности использования вычислительных машин — совершенствование средств программирования. Несоответствие между продолжительностью и стоимостью программирования сложных задач и временем и материальными затратами на самое решение — одна из центральных проблем современной вычислительной техники.

Для уменьшения трудоемкости составления программ такая работа в настоящее время возлагается на ЭЦВМ. Данный метод получил название «автоматического программирования». Задание записывается человеком в алгоритмическом языке, который, по существу, является входным языком алгоритма автоматического программирования (или транслятора), введенного заранее в качестве программы вычислительной машины.

Автоматизация программирования облегчит и упростит подготовку задач для решения их на вычислительных машинах. Однако от нее не получить возможного эффекта, если отдельные средства автоматического программирования будут выступать обособленно, а не образуют единую систему. В частности, к такой системе предъявляются требования обеспечить любой обмен информацией между человеком и машиной на одном из языков, удобных для человека; максимально использовать накопленный опыт работы на машине, в том числе широкое использование библиотеки стандартных подпрограмм; сделать возможным совместимость различных алгоритмических языков, реализованных в машине.

Важный фактор использования средств вычислительной техники — развитие системы их математического обеспечения. Несмотря на то, что на подготовку математиков-программистов затрачиваются значительные усилия, дело обстоит еще далеко не благополучно.

В настоящее время во всем мире наблюдается недостаток в математиках-программистах. Если существующая система подготовки программистов не изменится, то разрыв между числом подготовленных специалистов и потребностью в них будет возрастать с каждым годом. Содержание обучения не остается неизменным, поскольку создаются новые средства вычислительной техники и меняется программная часть математического обеспечения (появляются новые языки программирования, развиваются методы решения задач). Поэтому, разрабатывая вопросы подготовки программистов, необходимо учитывать тенденции в развитии систем «человек-машина» в целом в различных аспектах — техническом, математическом, экономическом, психолого-педагогическом и т. д.

Спрос на машинное время все возрастает. Для возможно полного удовлетворения потребностей времени предлагаются два направления, отражающие две противоположные тенденции в развитии систем «человек—машина»:

— отдалить пользователя от машины, «включив» между программистом и пользователем консультанта или специалиста по разработке систем, который по сформулированной пользователем проблеме составляет алгоритм ее решения;

— приблизить пользователя к машине, причем консуль-

тант в данном случае должен также оказывать помощь и при программировании задачи.

Частный случай — система, которая реализуется в тех случаях, когда достаточно подготовленный пользователь может обходиться без консультантов («прямой диалог»).

Сравнивая отдельные языки программирования, необходимо иметь в виду, что их сильные и слабые стороны различно проявляются в различных системах «человек — машина», в связи с чем следует учитывать:

— требования, которые предъявляются к пользователю, программисту и оператору в каждой системе;

— приспособленность системы к решению задач разных типов (задачи, алгоритм решения которых составляется до проигрывания на машине или в процессе решения, в результате взаимодействия человека с ЭЦВМ);

— задачи вычислительные, информационные, управления технологическими и производственными процессами; большие, средние и малые задачи (различающиеся количеством операций и временем решения на ЭЦВМ);

— возможность разработки и реализации системы (подготовка людей, построение вычислительной машины и СМО);

— учет условий эксплуатации (затраты на посредников между пользователем и машиной, максимально возможное сокращение времени прохождения задачи от постановки проблемы пользователем до получения результата в понятной для него форме и др.);

— удобство языков связи человека с вычислительной машиной.

Принято различать три типа входных языков: машинные, машинно-ориентированные и проблемно-ориентированные. Исторически первыми языками связи были машинные и машинно-ориентированные. Однако в последние годы они все больше вытесняются проблемно-ориентированными.

Достоинства машинно-ориентированных языков в возможности учесть особенности конкретной вычислительной машины и добиться оптимального программирования, сократить время вычислительного процесса (с учетом времени трансляции задачи), запрограммировать решение задач практически любого класса на достаточно мощной машине, облегчить отладку программы на имеющемся серийном оборудовании и др. К их недостаткам можно отнести следующее: процесс составления программы трудоемок, результат решения задачи трудно понять без специальной расшифровки; одну и ту же программу нельзя реализовать (без существенных изменений) на другой машине. Таким образом, общее время решения задачи (от составления алгоритма до получения готового результата в форме, понятной пользователю) больше, чем при использовании проблемно-ориентированных языков,

Проблемно-ориентированные языки весьма существенно отличаются один от другого как с точки зрения их возможностей для решения различных задач, так и с точки зрения «естественности», что влияет на время их усвоения, а также на удобство применения. Кроме того, эффективность использования этих языков во многом зависит еще и от качества трансляторов. Поскольку речь идет не о конкретном языке, а о типе языков, проблемно-ориентированным языкам можно дать лишь весьма общую характеристику. Наиболее характерная их черта — направленность на решение определенного класса задач — обусловлена стремлением помочь пользователю сформулировать и решить именно ту проблему, которая возникает в процессе его профессиональной деятельности. Эти языки предназначены для пользователей, а не для людей, обслуживающих машины и разрабатывающих системы математического обеспечения. Проблемно-ориентированные языки применяют выражения и средства, которые значительно ближе к существу решаемой проблемы (по сравнению с машинными и машинно-ориентированными языками). В настоящее время основной вопрос — разработка высокоэффективных узкоспециализированных языков, близких к языкам, применяемым специалистами в данной конкретной области, и реализуемых на основе системы синтаксических и семантических ограничений, накладываемых на разговорный язык данной области.

Каковы же достоинства проблемно-ориентированных языков? Прежде всего применение их не требует от пользователя знания машинных кодов конкретных машин, на которых будут решаться его задачи; реализация программ на проблемно-ориентированных языках практически не зависит от выбранной машины (таким образом, они представляют собой также удобное средство документации алгоритмов); составление программ в проблемно-ориентированных языках требует меньше времени, чем при использовании машинных и машинно-ориентированных языков. Кроме того, для специалиста в некоторой определенной области усвоить проблемно-ориентированный язык обычно легче, чем машинно-ориентированный, поскольку его диалект имеет большее отношение к сфере деятельности данного пользователя; программу в проблемно-ориентированном языке легче могут понять лица, не участвовавшие в ее разработке, и при наличии соответствующих технических средств отладка программы облегчается.

Недостатки проблемно-ориентированных языков связаны с необходимостью применения трансляторов, с увеличением машинного времени на решение задачи (особенно при использовании упрощенных трансляторов), с относительно меньшим кругом задач по сравнению с языками машинно-ориентированными, со значительным увеличением времени, необходи-

мым на усвоение, при универсализации проблемно-ориентированного языка.

Сопоставление достоинств и недостатков машинно-ориентированных и проблемно-ориентированных языков показывает, что в том случае, когда основная задача — это максимальное использование возможностей той или иной ЭЦВМ, сведение к минимуму времени вычислительного процесса, следует отдавать предпочтение машинно-ориентированным языкам. Если же необходимо уменьшить общее время решения задачи, облегчить составление и отладку программ, а также усвоение языка массовым пользователем, то, несомненно, следует использовать проблемно-ориентированные языки.

Алгоритмические языки в общем случае должны располагать средствами описания всех операций, выполняемых данным вычислительным комплексом, допуская одновременно достаточно простое преобразование в машинный код ЭЦВМ любой марки (из данной группы). При такой постановке задачи появляется возможность точного описания алгоритмов до выяснения того, на машинах какого типа данный алгоритм будет реализован. В то же время алгоритмический язык должен предусматривать возможность той или иной специализации. Последнее обстоятельство связано с тем, что для описания задач различных областей знаний нередко необходимы различные изобразительные средства, в общем случае учитывающие принятые обозначения, терминологию и т. п.

Таким образом, развитие средств вычислительной техники логически приводит к созданию некоего базового алгоритмического языка, который мог бы послужить основой для специализированных алгоритмических языков. В настоящее время большое внимание уделяется вопросам построения общей теории формальных языков. На ее основе может быть разработана единая гибкая базовая схема алгоритмических языков, включающая все уровни специализации — от машинного до субчеловеческого. По отношению к схеме конкретные алгоритмические языки должны представлять собой некоторые частные реализации. Получить их можно определенной интерпретацией различных изобразительных средств, на которые наложены естественные ограничения (выбор определенной формы записи из некоторого множества возможных форм и т. п.).

Базовой схеме могут быть предъявлены следующие требования в отношении «порождаемых» ею языков:

абсолютная четкость, не допускающая неоднозначности при реализации на вычислительной машине записанных в них алгоритмов;

лаконичность (избыточная информация в алгоритмическом тексте должна ограничиваться определенным минимумом);

удобство использования при составлении алгоритмов человеком и достаточная «наглядность» для максимальной простоты обучения чтению;

возможность эффективного преобразования алгоритмических текстов в программы для вычислительной машины, а также других видов обработки;

гибкость и изобразительное богатство (класс алгоритмов, описываемых на данном языке, должен быть достаточно большим);

строгая формализованность (синтаксис и семантика алгоритмического языка должны быть четко описаны).

Анализ структуры базовой схемы алгоритмических языков требует рассмотрения его частных реализаций (уровни, специализации, стили, диалекты и варианты алгоритмических языков).

Основные идеи в развитии системы «человек—машина» отталкиваются от необходимости приблизить пользователя к машине. Тому есть свои причины. Прежде всего с каждым годом увеличивается число пользователей управляющих машин. Успех функционирования систем «человек—машина» во многом зависит от подготовки пользователей в области программирования: совершенно ясно, что при этом они должны овладеть входным языком программирования.

Проблема подготовки к работе с управляющими машинами требует как системного исследования (анализ работы всех звеньев системы при участии специалистов в области вычислительной техники, общей психологии и психологии обучения), так и решения многих задач, одни из которых независимы, а другие находятся в иерархической последовательности. Цель такого исследования — разработка эффективных обучающих систем для входного языка.

Обучающая система — часть операционной, технической и «сервисной» системы ЭЦВМ или вычислительного комплекса. Она должна быть обеспечена обучающей программой в виде учебного пособия; пультами для прямой связи учащегося с машиной; вспомогательными устройствами (автономными или связанными с вычислительным комплексом); математическим аппаратом для управления обучением, для сбора и обработки статистических данных о ходе его; транслятором с входного языка.

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ — ИНСТРУМЕНТЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Надежность системы заложена при ее проектировании и изготовлении. Следовательно, как мы уже говорили, меры по повышению эксплуатационной надежности (предупреждение отказов, выявление потенциально ненадежных элементов и узлов, устранение дефектов до появления полного отказа) ориентированы главным образом на сохранение надежности уже имеющейся в аппаратуре. Скорость «расхода» надежности зависит от условий эксплуатации, квалификации обслуживающего персонала и т. п. Рациональная организация эксплуатации (правильный выбор частоты и объема профилактических мероприятий, соблюдение условий хранения запасного оборудования, регламентирование времени непрерывной работы и т. п.) позволяют получать результаты, эквивалентные снижению интенсивности отказов в системе.

Считается, что любое повышение надежности технического устройства — следствие каких-либо изменений в оборудовании (например, ремонт его или полная замена частей). Во многих случаях это действительно так. Однако иногда групповая надежность партий изделий может быть повышена просто благодаря предварительной проверке, без каких-либо профилактических или ремонтных работ, поскольку результаты ее позволяют правильно определить состояние технических устройств и своевременно принять меры для предотвращения эксплуатации неисправных элементов и их ремонта.

Для иллюстрации рассмотрим числовой пример. Допустим, имеется 100 устройств определенного вида. По результатам их эксплуатации сделан вывод: без предварительной проверки только 86 или 87 устройств из 100 дают удовлетворительные результаты. Если же перед началом эксплуатации провести предварительную проверку, то можно определить, что 3 или 4 устройства находятся в неудовлетворительном состоянии: их можно своевременно отремонтировать или за-

менить новыми; таким образом, вся серия будет иметь групповую надежность 90%. В данном случае не удастся повысить надежность выше 0,9: проверка недостаточно полна для определения слабых мест, которые могут привести к неисправности в будущем, а кроме того, дефекты могут проявиться в промежутке между проверкой и эксплуатацией.

Контроль надежности состоит из двух основных этапов:

— получение информации о состоянии технического устройства и ее обработка;

— восстановление — устранение возникших в процессе эксплуатации неисправностей.

Для выполнения перечисленных задач необходим ряд мероприятий. Их можно разбить на четыре группы:

— разработка научных методов эксплуатации;

— сбор и обобщение опыта эксплуатации;

— связь с производством и проектированием аппаратуры;

— повышение квалификации работников.

Современные методы эксплуатации должны включать научно обоснованные приемы подготовки к работе, проведения профилактики, ремонта и других мероприятий по поддержанию надежности технических устройств в процессе эксплуатации. Значительное число эксплуатационных мероприятий обычно назначается в результате статистических исследований.

Для разработки мер повышения надежности технических устройств при их проектировании и производстве необходимы данные о поведении деталей и отдельных узлов в эксплуатации. Обобщение данных по устройству в целом не всегда целесообразно, так как в настоящее время одно устройство весьма быстро заменяется другим, более совершенным. Узлы и детали меняются реже. Изучение особенностей их поведения дает возможность использовать накопленные данные для проектирования будущих устройств. Таким образом, сбор, обработка и обобщение данных об отказах деталей — важнейшая составная технического проектирования и эксплуатации, и на эту сторону работы должно быть обращено соответствующее внимание.

Важная проблема — разработка теории, методов и алгоритмов синтеза (проектирования) сложных объектов, поскольку объекты эти должны быть как можно лучше приспособлены к проверке и восстановлению нормального состояния. В настоящее время во многих случаях вопросы организации проверки работоспособности и поиска неисправностей решаются после того, как объект спроектирован или даже выполнен в металле. Такой подход не позволяет своевременно и активно учесть изменения и дополнения, которые целесообразно внести в него для того, чтобы повысить показатели контролеспособности и ремонтпригодности. Синтез объектов

с указанными свойствами предполагает наличие оптимальных программ проверки. Следует стремиться к разработке таких методов синтеза, которые позволят построить не только структуры синтезируемых объектов, но и оптимальные (оптимизированные) программы их проверки.

С синтезом объектов проверки тесно связана одна из главных практических целей технической диагностики — добиться такого положения, при котором проекты каждого нового более или менее сложного изделия, устройства или системы имели бы специальные разделы по решению задач проверки работоспособности и локализации неисправностей (с учетом особенностей всех периодов «жизни» объекта — производства, эксплуатации, хранения или пребывания в резерве).

Расход и восстановление избыточности технических изделий в эксплуатации. Устройство обычно проектируется со всевозможными запасами механической прочности (увеличение нагруженных сечений, толщины стирающихся поверхностей и т. п.), нагрузочной способности, возможных внешних воздействий; предусматривается старение изоляции, антикоррозионных покрытий, резервирование отдельных элементов и узлов и т. д. Некоторые из указанных занасов создают избыточность, необходимую для нормальной работы устройства в течение срока службы в различных эксплуатационных условиях.

В эксплуатации на техническое устройство воздействует ряд факторов, способствующих появлению неисправности, т. е. со временем избыточность уменьшается, происходят «старение» элемента, износ, местные частичные нарушения, разрегулировка и т. п. Любое увеличение надежности технического устройства связано с возрастанием в нем некоторой избыточности. Применение материалов более высокого качества, улучшение и упрощение конструкции, рационализация схемы, улучшение качества смазки — способы увеличения избыточности в техническом устройстве. Показатели надежности являются индикатором степени избыточности в некотором смысле. В частности, возрастание интенсивности отказов свидетельствуют о потере избыточности и о том, что с течением времени остаются работать устройства с большим запасом избыточности, а с меньшим выходят из строя.

Различают два вида избыточности: восстанавливаемую в эксплуатации и невозстанавливаемую. Чтобы обеспечить необходимый уровень надежности, нужно либо ввести такую невозстанавливаемую избыточность, которой было бы достаточно на весь срок службы, либо периодически восстанавливать израсходованную избыточность. Восстановление происходит обычно при проведении — регламентных и профилактических работ, которые, однако, невозможно проводить с необходимой частотой. Стало быть, особое значение приобрета-

ют контроль наличия достаточной избыточности и своевременное ее восстановление в процессе эксплуатации технического устройства.

При эксплуатационном контроле состояние технического устройства проверяется менее подробно, нежели при регламентных и профилактических работах; его надежность не восстанавливается до линии невозстанавливаемого снижения и тем не менее, как показывает опыт, такой контроль значительно повышает надежность.

В общем случае надежность закономерно снижается со временем, особенно при работе технического устройства или при воздействии на него неблагоприятных окружающих условий. Поэтому средством поддержания необходимой надежности являются их своевременная проверка и восстановление работоспособного состояния; степень восстановления существенно зависит от подробности проверки и совершенства методов и средств контроля.

Задачи технической диагностики. Рассмотрим три типа задач определения технического состояния объектов проверки.

1. Определение технического состояния, в котором находится объект проверки в настоящий момент времени — диагноз (распознавание).

2. Предсказание технического состояния, в котором будет находиться объект проверки в некоторый момент времени — прогноз (предвидение, предсказание).

3. Определение технического состояния, в котором находился объект проверки в некоторый момент времени — задачи генеза (происхождение, возникновение).

Задачи первого типа формально следует отнести к технической диагностике, второго — к технической прогностике (или, как чаще говорят, к техническому прогнозированию). Тогда отрасль знания, которая должна заниматься решением задач третьего типа, естественно назвать технической генетикой.

Задачи технической генетики возникают, например, в связи с расследованием аварий и их причин, когда настоящее (доступное проверке) техническое состояние объекта отличается от состояния, в которое он перешел в прошлом в результате появления первопричины, вызвавшей аварию. Решаются такие задачи определением возможных или вероятных предысторий, ведущих в настоящее время к объекту проверки.

К технической прогностике относится определение срока службы объекта проверки, периодичности его профилактических проверок и ремонтов. Решаются такие задачи выявлением возможных или вероятных эволюций объекта проверки от его настоящего технического состояния.

Таким образом, знание настоящего технического состояния объекта проверки обязательно как для генеза, так и для прогноза. Поэтому техническая диагностика представляет собой основу как технической генетики, так и технической прогностики, и естественно, что последние развиваются в тесной связи с первой. Не исключено, что со временем техническая прогностика и техническая генетика выделятся в отдельные направления, так как они, безусловно, имеют самостоятельные предметы исследований, проблемы, средства их решения, идеи, методы и т. п.

Итак, техническую диагностику, ее теорию, методы и средства можно определить как совокупность идей организации и реализации оптимальных процедур проверки технического состояния сложных объектов. Основные предметы исследований технической диагностики — системы проверки технического состояния и диагностические системы управления. В последние годы исследованы отдельные вопросы построения математических моделей объектов контроля, разработаны методы построения программ проверки для различных классов объектов, особенно для комбинационных дискретных и непрерывных динамических устройств, предложены методы оптимизации таких программ с учетом вероятностей состояний объектов контроля и стоимостей отдельных проверок. Ведутся работы по оценке эффективности систем технической диагностики, анализу деятельности человека в этих системах, созданию технических средств проверки объектов контроля.

К основным теоретическим и прикладным задачам в области технической диагностики относятся:

— развитие теории и разработка методов и алгоритмов построения математических моделей сложных объектов проверки, особенно моделей блочного типа для дискретных объектов с памятью, моделей, учитывающих переходные процессы и состязания в дискретных объектах, многозначных логических моделей и аналоговых моделей для непрерывных объектов проверки;

— разработка новых эффективных по объемам вычислений и памяти методов и алгоритмов анализа математических моделей объектов проверки, особенно для моделей, учитывающих кратные неустойчивые и стохастические неисправности произвольных видов;

— повышение эффективности использования динамического программирования, разработка новых методов и алгоритмов построений оптимальных и особенно оптимизированных программ проверки объектов;

— разработка теории, методов и алгоритмов синтеза сложных объектов проверки с учетом требований технической диагностики;

— разработка теории, методов и средств реализации диагностических систем управления;

— создание теории, методов и новых принципов построения встроенных средств проверки с учетом их унификации;

— исследование проблемы оптимального выбора и сочетания различных способов и средств проверки сложных объектов и разработка путей ее решения;

— развитие исследований по обобщению результатов работ в области теории, методов и средств технической диагностики, особенно методов построения программ проверки и анализа моделей объектов;

— усиление работ по доведению методов и алгоритмов построения математических моделей, их анализа и синтеза, а также построения программ проверки до машинных программ с тем, чтобы облегчить и ускорить внедрение современных методов технической диагностики в практику проектирования сложных объектов;

— централизация разработки и производства современных управляемых по сменной программе внешних автоматических средств проверки сложных объектов;

— разработка комплекса научно-технических и организационных мероприятий по созданию общегосударственной системы сбора и обработки статистических данных по объектам проверки, а также по системам проверки технического состояния и диагностическим системам управления в целом (это позволит сделать реальными многие исследования и результаты технической диагностики по оптимальной организации процедур проверки технического состояния сложных объектов, а также соответствующие работы по технической прогностке и технической генетике);

— поиск, разработка и применение новых математических моделей объектов контроля, эффективных как с точки зрения обработки диагностических задач большой размерности, так и с точки зрения формального описания сложных, в том числе непрерывных динамических объектов контроля;

— разработка теории и методов исследования и оптимального построения систем управления, содержащих в качестве подсистем диагностические системы управления и контроля;

— выявление методов оценки качества и эффективности систем технической диагностики;

— создание эффективных методов построения программ проверки для дискретных устройств с памятью;

— поиск новых и доводка существующих методов проверки работоспособности и локализации неисправностей управляемых по сменной программе объектов контроля, в том числе вычислительных и управляющих машин;

— разработка методов решения задач дискретной оптимизации, в первую очередь задач построения оптимальных и оптимизированных программ проверки объектов контроля;

— автоматизация построения программ проверки объектов контроля, в том числе разработка и внедрение в практику машинных алгоритмов решения задач технической диагностики;

— поиск идей, принципов построения, разработка и создание внешних технических средств проверки сложных объектов контроля;

— определение принципов построения комбинированных систем контроля устройств переработки информации, основанных на оптимальном сочетании программных и аппаратных средств диагностики;

— исследования вопросов прогнозирования технического состояния сложных объектов контроля;

— разработка и внедрение в практику методов проектирования объектов контроля с учетом требований эффективной организации процесса их проверки в условиях производства, эксплуатации и хранения.

Диагностика и управление процессом эксплуатации. Конечная цель подавляющего большинства научных и технических исследований и разработок — создание материальных ценностей как можно более высокого качества при наименьших затратах. Среди характеристик качества, понятно, одно из главных мест занимает надежность. Обеспечить требуемый уровень надежности изделий (простых и особенно сложных) невозможно без проверки и восстановления их технического состояния в условиях производства, эксплуатации или хранения. Процессы проверки и восстановления составляют суть процессов управления техническим состоянием изделий, устройств и систем. Эффективная организация такого управления — основная цель технической диагностики, которая, таким образом, выступает как одно из средств повышения надежности.

Повышение надежности главная (но, по-видимому, не единственная) область применения технической диагностики. В свою очередь, теория, методы и средства повышения надежности, естественно, используются при разработке и технической реализации диагностических устройств и систем управления и контроля, как и любых других устройств и систем.

Проверка технического состояния некоего объекта есть процесс управления им по определенной программе. Построение программы проверки, оптимальной в смысле экстремума той или иной целевой функции оптимизации, равносильно организации соответствующего оптимального процесса управ-

ления, результат которого — определение технического состояния объекта.

Результаты проверки технического состояния необходимы для активного воздействия на производство, эксплуатацию или хранение, что соответствует организации более сложного процесса управления, куда процесс проверки технического состояния входит как составная часть. Системы, которые реализуют управление и имеют в качестве нижнего уровня иерархии систему проверки технического состояния, носят название диагностических систем управления. Рассмотрим их работу на примере деятельности некоего аэропорта.

Объект проверки — самолет, техническое состояние которого определяется перед вылетом средствами проверки, по определенной программе, с учетом, возможно, некоторых параметров внешней среды (например, температуры окружающего воздуха и атмосферного давления).

В процессе проверки объект и система проверки взаимодействуют, на борт самолета подаются определенные управляющие воздействия и на них получают соответствующие ответы. По окончании результат, характеризующий техническое состояние самолета (например, исправен, неисправна такая-то бортовая система и т. п.), поступает в управляющее устройство, которое в соответствии с целью управления и состоянием внешней среды вырабатывает управляющее воздействие.

Целью управления, например, может быть требование минимальных отклонений от расписания вылетов самолетов при заданном уровне безопасности полетов.

К числу параметров внешней среды, учитываемых при управлении, могут относиться такие, как наличие резервных, готовых к вылету самолетов, время вылета проверяемого самолета по расписанию, данные о дате проведения и глубине предыдущей проверки, данные о метеорологических и других условиях на трассе и т. п.

Управляющими воздействиями могут быть следующие: разрешить вылет самолета, произвести более детальную проверку технического состояния некоторой бортовой системы, отправить самолет в ремонт, заменить его резервным, готовым к вылету, подать из ангара на проверку свободный самолет подходящего типа для возможной замены неисправного, перейти к проверке очередного самолета и т. п.

Таким образом, техническая диагностика охватывает специфические процессы управления и поэтому связана с управлением и контролем так же, как, например, регулирование или телеуправление, охватывающие другие классы процессов управления. Специфика технической диагностики, в частности, в специфике целей управления и в вытекающей отсюда необходимости разработки специальных методов расчета

оптимальных процессов управления (например, таких, как методы построения минимальных тестов или программ проверки с минимальным средним временем определения технического состояния).

Но вернемся к системам проверки технического состояния. Работы по их созданию удобно разделить на следующие четыре группы:

исследование объектов проверки;

теория, методы и алгоритмы построения программ проверки;

способы и средства проверки;

исследование свойств и характеристик систем в целом.

Эти группы отражают основные задачи технической диагностики в связи с эффективной организацией процессов проверки технического состояния сложных объектов.

Исследование объектов проверки предполагает изучение свойств и характеристик реальных физических объектов и методы построения их математических моделей. Изучение физических объектов наряду с их классификацией по областям применения, по энергетическим признакам, по характеру сигналов, по сложности и т. д. включает в себя также изучение неисправностей, исследования параметров, характеризующих как исправное, так и неисправное состояния объекта, сбора и обработки статистических данных. Необходима классификация неисправностей по их видам (например, устойчивые и неустойчивые), анализ причин возникновения, определение признаков неисправностей, вероятностей или частот их возникновения и т. п. Исследование параметров объектов проверки предполагает развитие методов задания допусков и определения контрольных соотношений между отдельными параметрами, точности их измерений при проверке объекта, определение законов их изменения для целей прогноза и генеза.

Большое значение для построения оптимальных программ проверки технического состояния реальных объектов имеют сбор и обработка статистических данных, особенно по вероятностям возникновения неисправностей и по затратам (времени, энергии, материальных или денежных средств) на отыскание неисправностей и их устранение и т. п. Статистические данные важны не только для оптимизации программ проверки, но и для решения задач технической прогностики и технической генетики.

Основа формальных методов построения программ проверки технического состояния объектов — математические модели.

Выделим следующие группы задач, которые решаются или должны решаться при разработке и исследовании математических моделей объектов проверки: классификация моделей,

разработка математических моделей неисправностей, разработка методов и алгоритмов их анализа и, наконец, разработка методов и алгоритмов синтеза структур объектов проверки с учетом требований технической диагностики.

Анализ математической модели объекта проверки относится к числу основных этапов построения программ проверки технического состояния объекта. Цель его либо получение таблицы функций неисправностей целиком, либо отдельных ее частей, а именно перечней неисправностей (пар неисправностей), обнаруживаемых (различаемых) данной отдельной проверкой, или перечней отдельных проверок, обнаруживающих (различающих) данную неисправность (пару неисправностей).

Известные методы анализа можно разделить на аналитические, имеющие дело с «формульным» представлением модели объекта, и структурные, работающие с моделью, заданной в виде его структуры. Как в аналитических, так и в структурных методах анализ поведения модели можно проводить по прямым и по обратным функциям ее компонентов. Он должен решать основную задачу: поиск и разработка эффективных, по объемам вычислений и памяти, методов и алгоритмов анализа.

Программы проверки. В общем случае проверка требует подачи на объект управляющих воздействий и контроля ответов на эти воздействия. Программа проверки представляет собой совокупность отдельных проверок в некоторой временной последовательности. Отдельная проверка определяется, с одной стороны, характером управляющего воздействия (т. е. тем, что подается и на какие входы объекта), с другой — характером ответа на воздействие (т. е. тем, что снимается и с каких выходов объекта). Результаты отдельной проверки определяются значениями ее ответа.

Качество программы существенно влияет на эффективность проверки, характеристики которой — затраты времени, материальных или энергетических ресурсов, человеческих усилий и т. п. Одна из возможностей сокращения затрат, а также упрощения средств реализации проверки — оптимизация программ, т. е. определение «наилучшего» состава входящих в программу отдельных проверок и «наилучшей» последовательности их реализации. Термин «наилучший» употреблен здесь в смысле экстремума некоторой принятой или заданной целевой функции оптимизации, зависящей, вообще говоря, от характеристик как объекта проверки, так и отдельных проверок, из которых может компоноваться программа.

Признаки, по которым классифицируют программы, обычно связывают с характеристикой последовательности реализации отдельных проверок, а также с частотой анализа их результатов. Различают безусловные и условные программы

проверки. Первое отличает жесткая последовательность реализации отдельных проверок; для условных программ характерно то, что в последовательности реализации их отдельных проверок имеется хотя бы одно место, предназначенное для незапрограммированной проверки, необходимость которой покажут результаты предыдущих отдельных проверок.

В зависимости от того, как часто проводится анализ результатов уже реализованных проверок, различают комбинационные, последовательные и комбинационно-последовательные программы. В комбинационных программах анализ проводится после реализации всех отдельных проверок, в последовательных — после реализации каждой отдельной проверки. В комбинационно-последовательных программах проверки хотя бы один раз анализ выполняется после реализации нескольких (но не всех) отдельных проверок.

Работ по построению программ проверки, оптимальных или оптимизированных в смысле числа отдельных проверок или средних затрат, очень много. Для них характерно разнообразие постановки задач, применяемого математического аппарата и методов решения, что затрудняет понимание, приводит к дублированию и замедляет внедрение программы в практику проектирования. В этой области особенно важны обобщающие работы, которые рассматривают процедуры построения программ проверки с общих позиций и тем самым позволяют научно обоснованно классифицировать как известные, так и новые результаты. В таких работах целесообразно использовать теорию вопросов, которая рассматривает задачи идентификации элементов конечных множеств с помощью разбиения последних на классы.

Способы и средства проверки. Способы проверки разбиты на три класса: программный, аппаратный и программно-аппаратный. Программный и программно-аппаратный находят применение в проверке объектов, работающих по сменной программе (универсальные и специализированные вычислительные, управляющие или логические машины). Аппаратным способом можно проверять любые объекты.

Допуская определенную идеализацию, можно считать, что основные средства реализации программного способа — рабочие программы объекта, содержащие, возможно, дополнительные операции, необходимые для его проверки, и тест-программы, специально составленные, исходя из требований конкретной проверки. С помощью рабочих программ проверка объекта осуществляется в процессе использования последнего по прямому назначению, в то время как реализация тест-программы требует перерыва в выполнении объектом его рабочих функций. Однако и в первом случае обычно необходимы непроизводительные затраты времени на дополнительные проверочные операции программы.

Аппаратурный способ проверки объекта может быть реализован встроенными или внешними техническими средствами. Встроенные средства — дополнительная аппаратура, входящая в объект; внешние средства — самостоятельная аппаратура, которая подключается к объекту эпизодически, по мере необходимости проверки последнего с ее помощью. Технические средства реализации аппаратурного способа проверки можно делить на автоматические, автоматизированные (или полуавтоматические) и ручные, в зависимости от степени участия человека. Внешние средства могут принадлежать любому из этих классов, встроенные обычно автоматические и реже автоматизированные.

Лучшее решение задачи проверки сложных объектов в процессе производства и эксплуатации или хранения — правильное сочетание как обоих способов проверки — программного и аппаратурного (для объектов, работающих по сменной программе), так и разных средств реализации этих способов. Оптимальный выбор и сочетание различных способов и средств проверки — одна из важнейших еще нерешенных проблем технической диагностики, которую необходимо также решать комплексно, с учетом всех этапов жизни объекта (производство, эксплуатация, хранение).

Для разработки и создания встроенных и внешних средств проверки важны вопросы их унификации и универсализации. Что касается внешних средств проверки сложных объектов (например, электрических кабельных изделий и монтажа, сложной релейной коммутационной аппаратуры, самолетов, электровозов и т. п.), идеи универсализации и унификации в последние годы получили принципиальное признание, хотя темпы внедрения их в промышленность еще невысоки.

При создании встроенных средств проверки для ЭЦВМ широко используют корректирующие коды. В других случаях преобладает эмпирический подход, основанный на интуиции и искусстве инженера-проектировщика. Разработка теории и методов построения таких средств и оптимального сочетания их с программными и внешними средствами, а также их унификация — важный предмет исследований технической диагностики.

Работы по теории и методам создания встроенных средств проверки приобретают особое значение в связи с развитием микроэлектронной технологии и созданием однородных структур и вычислительных сред. В связи со значительными возможностями роста интеграции активных элементов в одном кристалле, с одной стороны, и трудностями существенного увеличения числа внешних выводов — с другой, становится целесообразным в максимальной степени возложить функции проверки работоспособности и локализации неисправностей

на встроенные средства. Следует иметь в виду, что качество средств и программ проверки — два основных фактора, определяющих ее эффективность. Поэтому созданию экономических, быстродействующих и надежных средств проверки следует уделять столь же большое внимание в рамках технической диагностики, как и построению ее оптимальных программ. Тем более что систематическое получение достоверных статистических данных по объектам и системам проверки невозможно без значительного повышения уровня автоматизации проверки технического состояния объектов, а также уровня унификации средств проверки с тем, чтобы была гарантирована требуемая точность измерений и максимально исключено влияние субъективных факторов при документировании результатов.

Общесистемные вопросы. К ним относятся вопросы оптимальной организации систем, включающие в себя выбор стратегии проверки и структуры системы с учетом условий ее применения, свойств и характеристик объекта проверки и других факторов. Важное значение имеют исследования по методам оценки эффективности систем проверки, их надежности и достоверности, а также классификация систем проверки. Существует заметное число работ по оценкам эффективности, надежности и достоверности систем, однако, недостаточно работ, результаты которых доведены до практического применения. Тому есть свои причины, одна из которых, в частности, — отсутствие достоверной статистики результатов эксплуатации работающих систем проверки, что объясняется низким уровнем автоматизации и унификации средств проверки сложных объектов.

Методы автоматического контроля технического состояния. Для выяснения состояния технического устройства используется несколько методов контроля. Один из наиболее распространенных — определение работоспособности технического устройства по состоянию отдельных его элементов. Выполняется комплекс измерений величин, характеризующих состояние элементов и узлов проверяемого устройства, измеряются угловые и линейные перемещения (выходные величины электромеханических узлов), спектор шумов омических, индуктивных, емкостных и комплексных сопротивлений, сопротивлений изоляции и других электрических параметров, устанавливается целостность электрических цепей, определяются положения управляющих элементов.

Обычно для измерения механических, гидравлических и других неэлектрических величин их преобразовывают в электрические. Используются первичные преобразователи, либо встроенные в техническое устройство, либо подключаемые к нему на время проверки. По значениям параметров, характеризующих состояние отдельных элементов и узлов, выносятся

ся суждение о состоянии всего устройства в целом. Этот метод, к сожалению, не позволяет выявить дефекты в связях элементов и узлов, а также не учитывает влияние параметров одних элементов на другие, что снижает достоверность контроля. Более точен метод определения работоспособности по реакции устройства на контрольный (эталонный) сигнал.

Как известно из теории автоматического регулирования, в зависимости от вида контрольного сигнала изменяется характер реакции системы, но контрольному сигналу определенной формы (если система работоспособна) должна соответствовать вполне определенная по характеру реакция. Изменение состояния системы, т. е. ее работоспособности, приводит к изменению характера реакции на контрольные сигналы. Следовательно, анализируя реакции устройства на контрольные сигналы, можно определить его работоспособность.

Наиболее распространенными контрольными сигналами являются единичный импульс входного воздействия, единичный скачок и синусоидальный сигнал. В ряде случаев оценить работоспособность устройства можно по показателям качества переходного процесса, т. е. параметрам переходной характеристики — крутизна, максимальное перерегулирование, колебательность, время и ошибка регулирования. Такой метод контроля наиболее применим для систем регулирования и управления.

В связи со сложностью определения импульсной переходной функции диагностируемого объекта, полностью характеризующей динамическое состояние объекта, представляют интерес иные пути получения необходимой для диагностики неисправностей информации.

Спектральная концепция. Основана на том, что для значительного числа элементов и систем ухудшение выходных характеристик сопровождается увеличением внутренних шумов. Преимущество ее перед вероятностно-статистическими методами при анализе надежности технических устройств в следующем: спектральные методы позволяют оценивать надежность данного конкретного образца аппаратуры и реализовать устройства, контролирующие надежность системы в процессе эксплуатации.

Энергетическая концепция надежности. Базируется на оценках изменения энергетических характеристик системы в процессе работы. Определяющим служит то обстоятельство, что особенностью всякой системы является потеря части потребляемой энергии (мощности). Вследствие этого количество энергии, теряемой внутри системы, точно так же, как и коэффициент полезного действия, может служить критерием изменения качества функционирования (а следовательно, и надежности) системы.

Наиболее точные сведения можно получить при контроле

реально работающего устройства, поскольку оно находится в типичных условиях окружающей среды, под воздействием типичных нагрузок и при типичных управляющих воздействиях.

Определение работоспособности функционирующей системы возможно потому, что в системе имеется некоторый запас энергии. Это, однако, затрудняет использование контрольного сигнала, поскольку на реакцию системы, обусловленную контрольным сигналом, накладывается реакция, определяемая накопленной энергией. Очевидно, определить работоспособность системы по реакции на контрольный сигнал можно только тогда, когда такая реакция значительно превышает по уровню реакцию, обусловленную запасом энергии в системе. Если же работающая система обладает большим запасом энергии или по условиям работы недопустимо дополнительное воздействие на нее, то необходимо отключить систему на время контроля либо, если это возможно, провести его без подачи контрольного сигнала.

Задача может быть решена двумя путями. В первом случае в результате анализа технического устройства для контроля выбираются определенные параметры, достаточно полно характеризующие состояние устройства. Во втором работоспособность определяется сравнением реакции или действий контролируемого устройства с реакцией или действиями модели системы. Строится модель, которая адекватно определяет свойства контролируемой системы; иногда построение полной модели системы оказывается сложным, поэтому ограничиваются моделированием только тех характеристик, которые представляют непосредственный интерес. Тогда контролируемая система рассматривается как единый блок и моделируется конкретное динамическое соотношение между соответствующими входами и выходами системы.

Аппаратура контроля. Общие требования. Чтобы обеспечить подробную и точную проверку сложной системы за достаточно короткое время и снизить затраты времени на обслуживание, необходимо, чтобы проверочное оборудование работало быстро и надежно. Это же оборудование должно обеспечивать поиск дефектов, указывать неисправные, легко заменяемые блоки без участия в этой работе опытных специалистов.

Проверочное оборудование должно быть гибким, точным и надежным, обеспечивать необходимую полноту проверок и иметь достаточную надежность. Особенно важно согласование методов проверки и проверочного оборудования, используемых на различных стадиях обслуживания в заводских и полевых условиях, с тем, чтобы результаты всех проверок могли непосредственно сравниваться между собой, быстро обрабатываться и корректироваться.

Специальные требования. При выборе общих принципов

проверки необходимо учитывать целый ряд взаимосвязанных факторов:

- цель проверки;
- сложность проверяемого устройства, которая определяется числом проверяемых точек и общим числом проверок;
- допустимый расход времени на проверку;
- необходимая степень детализации проверок;
- требующаяся надежность проверочного оборудования;
- требующаяся гибкость проверочного оборудования;
- окружающие условия;
- допустимая стоимость.

Обычно цель проверки — установление готовности устройства к дальнейшей эксплуатации или необходимости ремонта.

Ограничения времени определяются назначением проверяемого устройства и его динамическими характеристиками. Возможность проведения сложной проверки за короткое время представляет большую ценность. При такой проверке до минимума сокращаются старение и износ оборудования, что, в свою очередь, позволяет в случае необходимости производить проверки значительно чаще.

Надежность определяется продолжительностью работы проверочного устройства в реальных полевых условиях или в условиях завода. В понятие надежности проверочного устройства включается не только вероятность безотказной работы элементов системы, но и достоверность контроля. Очень важно, чтобы результаты контроля были максимально достоверными, так как ложные результаты могут повести к значительным потерям времени и средств. Поэтому от проверочного оборудования требуется более высокая надежность, чем у проверяемой системы: конструкция и схема проверочного оборудования должны позволять проведение самопроверки, быстрого поиска отказавшего блока и быстрой его смены.

Гибкость проверочного оборудования в широком смысле обозначает качество, которое позволяет не только быстро перестраивать проверочное оборудование в пределах требований любой конкретной системы, но и применять его для широкого класса аналогичных устройств.

Ограничения стоимости существенно влияют на все другие факторы, учитываемые при конструировании проверочного оборудования. При рассмотрении общей стоимости необходимо принимать во внимание не только стоимость разработки и производства, но и необходимость подготовки персонала, возможности потерь вследствие повреждения оборудования.

Классификация систем автоматического контроля. Существующие проверочные устройства можно классифицировать с различных позиций: по целевому назначению аппаратуры, по

назначению объектов, контроль состояния которых необходимо осуществлять, по степени автоматизации процесса проверки.

По целевому назначению различают устройства для проверки состояния (исправности) аппаратуры, для отыскания неисправных деталей и узлов и предсказания безотказной работы технического устройства.

По назначению проверяемых устройств системы контроля можно подразделить на системы контроля стационарных объектов (промышленные и специального назначения) и подвижных объектов однократного и многократного использования. Функции системы контроля промышленных объектов в настоящее время сводятся к наблюдению за производством, чтобы централизовать и сократить поступающую информацию: системы контроля только поставляют информацию о ходе производственного процесса, т. е. практически решают лишь задачу определения работоспособности контролируемого объекта.

Несколько другое назначение в соответствии с этим и другую структуру имеют системы автоматического контроля специальных объектов. Контроль в таких системах обычно осуществляется по принципу проверки на функционирование отдельных подсистем и всего оборудования стартовой установки в комплексе.

К подвижным объектам многократного использования, в которых сделаны первые шаги по автоматизации контрольных операций, относятся самолеты и суда. Особенность контроля подобных объектов — необходимость его выполнения как при работающем, так и при неработающем оборудовании: отсюда специфика построения систем контроля подвижных объектов многократного использования. Кроме того, на их структуру влияют задачи, которые они призваны решать в данном случае, а именно не только определять работоспособность, но и обнаруживать причину ее потери, т. е. возникшую неисправность.

Наиболее перспективным направлением развития систем контроля оборудования подвижных объектов, например самолетов, следует считать наземнобортовой контроль. На борту устанавливается система регистрации параметров оборудования с последующей, на земле, расшифровкой записи. Предстартовый, послеполетный контроль и контроль на этапе регламентных работ выполняются специальными системами. Имеется возможность определять состояние работающего оборудования в реальных условиях, т. е. в условиях полета, и производить проверку оборудования, предназначенного к эксплуатации.

По степени автоматизации проверочная аппаратура делится на три вида: ручная, полуавтоматическая и автоматическая.

ческая. К ручной аппаратуре относятся обычные измерительные приборы, а также специальные устройства, которые более половины времени управляются вручную. В полуавтоматической аппаратуре отдельные циклы проверок проводятся автоматически, а начало и остановку проверки осуществляет оператор. Ручное управление занимает меньше половины всего времени проверки. В автоматической аппаратуре вся последовательность операций протекает без вмешательства человека. Аппаратура считается автоматической, если она управляется оператором менее 2% всего времени проверки.

Степень необходимой автоматизации проверки определяется несколькими факторами, а именно:

- экономической целесообразностью,
- методом проверки,
- физическими возможностями реализации принятых методов проверки.

Рост сложности современных технических устройств и систем обуславливает необходимость автоматизации процессов измерения параметров устройств и отыскания в них отказавших элементов или узлов. Благодаря высокому быстродействию устройств автоматического контроля значительно сокращается время проверки. Кроме того, удается измерять с высокой точностью такие параметры устройств в динамическом режиме работы, которые при ручном и даже полуавтоматическом контроле не проверяются.

Автоматизация испытаний позволяет устранить трудности, связанные с организацией ремонта, нехваткой квалифицированных кадров и их подготовкой. При этом обеспечивается необходимая гибкость систем для выполнения строгих требований при обслуживании сложных современных технических устройств.

При автоматической проверке облегчается регистрация характеристик, необходимых при последующем анализе надежности эксплуатируемой аппаратуры и выдаче рекомендаций промышленности для создания новых устройств и систем. Поэтому установки автоматического контроля оказываются экономически выгодными.

Недостатки автоматизированных систем контроля следующие:

- невозможность механизации некоторых функций человека-оператора;
- относительно большой износ по сравнению с аппаратурой ручного контроля;
- высокая стоимость автоматической аппаратуры.

Изложенные выше соображения приводят к заключению, что, по-видимому, ручная и полуавтоматическая проверочная аппаратура будут использоваться в ближайшем будущем в лабораториях при разработке различных технических

устройств, на заводах и при типовых испытаниях готовых образцов. Автоаппаратура контроля найдет применение при выпуске изделий с завода, в ремонтных мастерских и при эксплуатации сложных технических устройств, т. е. там, где необходимо многократно повторять типовые и шаблонные операции. Рассмотрим теперь экономическую эффективность системы автоматического контроля на примере. Возьмем навигационно-бомбардировочное оборудование самолетов и систем наведения управляемых ракет. Сравним количество бортовых систем бомбардировщиков США В-47 и В-29. Из приведенных в зарубежной печати данных видно, что на бомбардировщике В-47 бортовых систем стало на 55% больше, количество радиоламп увеличилось более чем в 3 раза.

На современном бомбардировщике установлены сложные электронные, воздушные и гидравлические системы, вычислительные устройства для навигации и бомбометания, устройства для пуска ракет, системы автоматического управления полетом. Обслуживающий персонал высокой квалификации затрачивает много времени, чтобы определить запасы надежности этих систем.

Вот некоторые данные о росте количества человеко-часов, затрачиваемых на обслуживание оборудования (на один час полета) различных типов самолетов ВВС США. Если трудовые затраты на обслуживание бомбардировщика В-52 принять за 100%, то для самолета В-47 эти затраты — 120%, а для истребителей — около 220%. При этом увеличивается и количество обслуживающего персонала.

Все это привело к созданию высокопроизводительных автоматических систем контроля. Хотя стоимость таких систем примерно 30% стоимости проверяемого оборудования, тем не менее они окупаются в течение 3—5 лет. Кроме того, существенно повышаются готовность авиационной техники, безопасность полета и вероятность выполнения задач.

По данным иностранных авиационных фирм при переходе к обслуживанию авиационной техники по фактическому ее состоянию удается увеличить межремонтные сроки не менее чем в 1,5 раза.

Внедрение системы автоконтроля позволит более объективно оценивать состояние оборудования, даст экономический эффект благодаря тому, что блоки не будут снимать по подозрению, а также сократится ЗИП.

Результаты расчетов показывают, что при внедрении автоматизированного контроля в техническое обслуживание авиационной техники вероятность отказов в полете может быть снижена примерно на порядок. Именно поэтому за рубежом вкладываются огромные средства в создание таких систем. По данным зарубежной печати расходы США на обо-

рудование проверки реактивных снарядов и космических кораблей составили в 1965 г. 1 млрд. долларов.

* * *

Итак, заканчивая разговор о «проблеме № 1», как называют надежность истории техники, еще раз подчеркнем: надежность — проблема комплексная, все этапы борьбы за нее равнозначимы, пренебрежение чем-либо, что кажется на первый взгляд незначительным, может привести к самым тяжелым последствиям. В идеале было бы желательно, чтобы со всеми «острыми углами» надежности кончали бы уже на этапе проектирования: на сегодня такая постановка вопроса не реальна. Поэтому, уделив основное внимание методам и способам повышения эффективности изделий на этапе проектирования, мы сочли необходимым рассказать о тех возможностях, которые открывает в данном вопросе правильная организация эксплуатации оборудования.

Проблема надежности всегда будет волновать создателей новой техники. Разрешатся одни вопросы — возникнут другие. Устареют приемы повышения надежности — разработчики создадут новые. Надежность, правда, уже в новом качестве всегда будет «проблемой № 1».
