**ГЛАВА 8. ИСТОРИЯ НАУКИ О НАДЕЖНОСТИ МАШИН, СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД**

В историческом развитии человека можно выделить два основных этапа развития техники: первый восходит к древнейшим временам (каменному веку) и состоит в поисках конструкций, многократно увеличивающих мускульную силу человека, второй датируется текущим столетием и характеризуется поисками конструкций, позволяющих во много раз увеличить его умственные способности.

В древности и в Средние века ценность человека определялась силой его мышц. В настоящее время мощность, развиваемая человеком физического труда, составляет (в среднем) едва несколько десятков ватт: это значит, что при современных ценах на электроэнергию стоимость этого труда составляет менее 1% его зарплаты. Сейчас при физической работе все более ценятся профессиональные навыки, опыт, находчивость и т. д. Опыт и навыки ценятся выше всего, так как являются результатом длительного процесса проб и ошибок, в котором «участвовали» умственные и физические усилия многих поколений. Так называемые машинные конструкции позволяют исключить не только тяжелый физический труд человека (путем механизации), но и скучные, однообразные действия (посредством автоматизации).

Начиная с первых лет XIX в. происходило широкое и быстрое внедрение механизации в производственные процессы. Во второй половине XX в. все интенсивнее шла механизация и автоматизация сложных производственных процессов. Результатом механизации и автоматизации был колоссальный рост производительности труда. Подсчитано, что за сто лет (с 1900 по 2000 г.) производительность труда в развитых странах возросла более чем в 15 раз, причем главным образом за счет механизации и автоматизации производства, в 1900 г. около 94% производственных процессов совершалось вручную и только 6% были охвачены механизацией, тогда как в 2000 г. пропорция стала обратной: около 94% процессов было механизировано и автоматизировано и только 6% совершалось вручную.

За эти же сто лет (1900-2000) производительность умственного труда возросла только вдвое. Существует обоснованное предположение, что причиной такого низкого темпа роста производительности умственного труда было применение в этой области машин и приборов с очень низкой степенью надежности.

Создатели первой быстродействующей электронной цифровой машины ЭНИАК, построенной в США в 1945 г. и состоявшей всего лишь из 18 000 электронных ламп, 1500 реле и нескольких десятков тысяч сопротивлений, конденсаторов и т. д., с изумлением наблюдали, как их машина – плод многолетней работы коллектива – портится каждые 15 – 20 мин. Одна из сотрудниц, обслуживавших машину, писала: «...ЭНИАК, на котором мы работали, действовал быстрее прежних математических машин, но оказался машиной очень хрупкой и, можно сказать, капризной. Какие-нибудь лампы или контуры постоянно портились, а нам приходилось стоять без дела».

Беспрерывно совершенствуемый ЭНИАК работал для Центра баллистических исследований США до конца 1955 г., т. е. 10 лет. Хотя конструкторы, а потом и весь персонал ЭНИАКа выполняли свою работу хорошо, машина то и дело ломалась и делала ошибки в расчетах – иначе говоря, она не была надежной. Поэтому возникла совершенно новая техническая проблема, которую можно сформулировать следующим образом: «Можно ли построить достаточно надежную машину из элементов с конечной надежностью?».

Ответ на этот вопрос, основной для теории надежности, был получен только в 1952 г. Как формулировка вопроса, так и ответ на него были даны Дж. фон Нейманом в книге «Логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент». В 1956 г. Э. Мур и К. Шеннон, обобщив выводы фон Неймана, доказали, что, применяя достаточное количество так называемых ненадежных элементов, можно построить техническую конструкцию с довольно высокой и требуемой степенью надежности. Так, из потребностей инженерной практики родилась новая теория, которую сейчас мы называем теорией надежности.

Проблема надежности для инженерного дела также стара, как и проблема здоровья для медицины. На протяжении всей истории человечества сооружения неожиданно разрушались, корабли тонули, гибли люди. Но осознание причин и следствия таких событий стало происходить только в ХХ веке, когда была создана теория надежности и определены методы ее использования в инженерном деле.

Теория надежности прослеживает и предсказывает судьбы конструкций в течение всего их существования, включая «рождение» (период проектирования и изготовления) и «жизнь» (период эксплуатации) вместе с периодами различных «недомоганий» и «болезней» (ремонтов и простоев), приводящих в конечном счете к «смерти» конструкции (этап сдачи технической конструкции на слом) вследствие морального или технического износа.

В нашей стране проблема надежности машин в концептуальном аспекте впервые была выдвинута и обсуждена на сессии Академии наук СССР в 1934 году. На первых этапах развития теории надежности основное внимание сосредотачивалось на сборе и обработке статистических данных об отказах изделий. В оценке надежности преобладал характер констатации количественных характеристик потока отказов на основании статистических данных. Развитие теории надежности сопровождалось совершенствованием вероятностных методов исследования, таких как определение законов распределений наработок на отказ, разработка методов расчета и испытаний изделий с учетом случайного характера отказов и т.п

Вместе с тем возникали новые направления исследований, связанные с поиском принципиально новых способов повышения надежности, прогнозированием отказов и прогнозированием количественных показателей надежности, анализом физикохимических процессов, оказывающих влияние на надежность, установлением корреляционных связей между характеристиками этих процессов и показателями надежности, совершенствованием методов расчета показателей надежности изделий, обладающих все более сложной структурой, с учетом всё большего числа действующих факторов (достоверность исходных данных, контроль и профилактика, условия работы и обслуживания т.д.). Испытания на надежность совершенствовались главным образом в направлении проведения ускоренных и неразрушающих испытаний. Наряду с совершенствованием натурных испытаний широкое распространение получили математическое моделирование и сочетание натурных испытаний с моделированием. В результате к середине ХХ-го века сформировались основы общей теории надежности и её частных направлений по отдельным видам техники.

В СССР основателями теории надежности были И.А. Ушаков, Я.М. Сорин, А.М. Половко, И.А. Рябинин. Их работы опирались на математические методы надежности, разработанные академиками УССР Б.В. Гнеденко и его коллегами А.Д. Соловьевым и Ю.К. Беляевым и Д.И. Кузьминым (рис.П2.3.1, П2.3.2).



Рисунок 8.1. Основатели советской школы теории надежности

Увеличивающаяся сложность технических устройств, возрастающая ответственность функций, выполняемых техническими системами, повышение требований к качеству изделий и условиям их работы, возросшая роль автоматизации управления техническими объектами – основные факторы, определившие главное направление в развитии науки о надежности. Машины становились все более сложными, количество элементов в них исчисляется десятками тысяч. Если не принимать специальных мер по обеспечению надежности, то любая машина практически окажется неработоспособной.

Круг вопросов, входящих в компетенцию теории надежности, на наш взгляд, наиболее полно сформулировал академик А.И.Берг: "Теория надежности устанавливает закономерности возникновения отказов и восстановления работоспособности системы и её элементов, рассматривает влияние внешних и внутренних воздействий на процессы в системах, создает основы расчета надежности и предсказания отказов, изыскивает способы повышения надежности (при конструировании и изготовлении систем и их элементов, а также способы сохранения надежности при эксплуатации)".

Система и цель должны находиться в определенном соответствии. Улучшение характеристик конкретной системы, обеспечивающей высокую эффективность достижения цели, может оказаться неэффективным для обеспечения достижения этой же цели. Здесь же подчеркнем, что оптимизацию структур технических систем по определению невозможно осуществлять без учета основного события теории надежности – отказа, природа которого исчерпывающе описывается законом возрастания энтропии (энтропия) или потерей упорядоченности структур (информация).

Иллюстрируя сказанное конкретными законами физики и химии, отметим, что эволюция энергии при развитии повреждающих процессов исчерпывающе описывается первым и вторым законами термодинамики: первый закон утверждает неуничтожаемость энергии, второй – указывает направления развития процессов. Согласно принципам термодинамики, мерой преобразования и изменения энергии тела (системы тел) служит энтропия, приращение которой:

DS = DSо + DSн.

Это отношение есть формулировка второго закона термодинамики, данная И.И. Пригожиным. Слагаемое DSo характеризует изменение энергии тела в результате обмена веществом и энергией с внешней средой; слагаемое DSн – изменение энергии тела в результате необратимого преобразования, вызываемого течением физико-химических процессов и преобразованиями одних видов энергии в другие.

Показатели надежности той или иной системы в преобладающей степени формируются путем многокритериальной оптимизации, обеспечивающей рациональное сочетание факторов наследственности и изменчивости с учетом эксплуатационноклиматических, социальных, антропологических и других факторов.

Среди перечисленных факторов наиболее интересным является социальный фактор. Современные технические системы нельзя рассматривать изолированно не только от человека- оператора, потребителя продукции, пассажира и т.п., но и от социума в целом. Научно-техническая революция привела к появлению во второй половине ХХ века нового класса систем – эргатических, структурной частью которых является человек-оператор.

Интерес к проблеме системы человек – машина (СЧМ) возник в середине ХХ в.; он был обусловлен тем, что в качестве объектов технического проектирования и конструирования стали всё чаще выступать различного рода системы (управления производством, транспортом, связью, космическими полётами и т.п.), эффективность функционирования которых во многом определяется деятельностью включаемого в них человека. Сочетание способностей человека и возможностей машины (или совокупности технических средств) существенно повышает эффективность управления. Несмотря на совместное выполнение функций управления человеком и машиной, каждая из двух составляющих системы подчиняется в работе собственным, свойственным только ей закономерностям, причём эффективность функционирования системы в целом определяется тем, в какой мере при её создании были выявлены и учтены присущие человеку и машине особенности, в том числе ограничения и потенциальные возможности.

Одна из важнейших проблем построения систем человекмашина (СЧМ) – оптимальное распределение функций между оператором и техническими средствами, т.е. определение операций (и действий), которые должны выполняться человеком и машиной для обеспечения требуемой эффективности действия системы. Возможны два основных варианта распределения функций: в первом человек выполняет только операции контроля за машинным процессом решения задачи и утверждает решение; во втором часть операций выполняется человеком и машиной совместно, иначе решение не может быть получено. Первый вариант – это своего рода параллельная организация взаимодействия человека с машиной, второй – его последовательная («пошаговая») организация.

При выборе того или иного варианта должны учитываться соображения методологического характера, касающиеся социальной функции человека как субъекта труда, а также практической рекомендации науки об управлении, включая и рекомендации по организации управления в высших звеньях систем. Важное место в таком обосновании должно принадлежать инженернопсихологическим оценкам и использованию результатов изучения психофизиологических функций человека.

По современным представлениям обоснование рационального (и даже оптимального) распределения функций должно базироваться на количественных оценках качества решения задач человеком (и машиной) и оценках влияния этого качества на общую эффективность системы. Такие задачи решает область науки, называемая системотехникой. С помощью концептуального аппарата системотехники описываются хотя и не все (что является очевидным), но наиболее существенные для проектирования аспекты человеческой деятельности, и основная инженернопсихологическая проблематика – это операциональное «измерение человеческих параметров», необходимых для придания определенности системотехническим моделям.

Обеспечение надежности системы "человек-машина", является в настоящее время главной задачей, при этом уже не подвергается сомнению, что определяющее значение имеет надежность человека-оператора. Ключевой эргатический фактор состоит в том, что, управляя современными техническими системами, оператор постоянно взаимодействует не с управляемыми объектами, а с их информационными моделями.

Недостатки, препятствующие человеку быть идеальным оператором, хорошо известны: недостаточная скорость и точность выполнения операций, быстрая утомляемость, подверженность влиянию разнообразных субъективных факторов. Статистика показывает, что в авиации до 70% летных происшествий случается по вине человека. Более 56 % из общего числа происшествий, где обошлось без смертельного исхода, приходятся на сенсомоторные акты. Около 52 % от числа трагических случаев сводятся к ошибкам категории ”Принятие решения”. Ошибки человека являются основной причиной большинства аварий и других инцидентов. По проведенным исследованиям, ошибки человека вызвали от 60 до 80 % аварийных случаев, в то время как конструктивные недостатки оборудования дали лишь немногим более 10%.

Существует еще довольно большой класс систем, которые до недавнего времени находились вне поля зрения системотехников. Это системы, в которых помимо человека –оператора, объектом деятельности являются люди (медицина), животные (сельское хозяйство), растения (они живые) и биологические объекты простейшего уровня (дрожжи, грибки, бактерии, микробы, т.е. биологические объекты). При прогнозировании надежности функционирования таких систем необходимо учитывать особенноси биологического звена.

Теория надежности развивается в тесном взаимодействии и сотрудничестве с математикой: с одной стороны, математический аппарат широко используется для решения задач надежности технических систем, с другой стороны, практика решения проблем надежности ориентирует и стимулирует развитие самой математики.

Центральное место в использовании математического аппарата для решения проблем надежности занимают процессы обработки данных и принятия решений. При этом в соответствии с поставленной задачей исследования, как правило, необходима идеализация реальной технической системы, в ходе которой её свойства абстрагируются и отождествляются со свойствами математических объектов, в результате чего исследователь синтезирует математическую модель технической системы.

Успешное решение этой задачи в значительной мере определяется опытом, и существуют общие требования, предъявляемые к математической модели: стандартная форма, необходимая и достаточная точность, предельная простота.

Моделирование компонентов системы, как правило, значительно проще, чем моделирование системы в целом, поскольку, несмотря на огромное разнообразие систем, набор их компонентов весьма ограничен, и стандартизированные модели различных компонентов, полученные однажды, могут затем многократно использоваться при моделировании сложных систем.

Математику в зависимости от её точки зрения на моделируемый объект подразделяют на метаматематику, формальную математику, содержательную математику и прикладную математику. Из перечисленных разделов два последних используются в качестве математического аппарата теории надежности, поскольку предметом содержательной математики являются системы абстрактных объектов, наделенных конкретным содержанием и называемых конструктами, а прикладная математика истолковывает объекты формальных и содержательных теорий в категориях реального мира (эмпирическая интерпретация).

Параметры системы и приложенные к ней воздействия в зависимости от их реальной природы интерпретируют в виде детерминированных или статистических моделей. Последние имеют особо важное значение при исследовании сложных систем с большим количеством связей, обладающих трудно учитываемыми свойствами. Теория надежности основывается на вероятностностатистической природе самого феномена надежности. Из множества состояний, в которых может находиться система, выделяется подмножество состояний, различающихся между собой с точки зрения показателей надежности. Это подмножество называют фазовым пространством надежности системы, изменяющимся в процессе её эксплуатации.

При построении конкретных моделей понятия философского и общенаучного уровней, как правило, трудно формализуемые, отображаются качественными связями, а понятия конкретного и специализированного уровней – формализуемы и отображаются количественными соотношениями. Системный подход базируется на использовании соответствующих законов и категорий диалектики – часть и целое, содержание и форма, качество и количество и др.

Всякая система обладает определенной детерминированной, или вероятностной, структурой. При этом человек, сам являясь конструкцией, доведенной Природой до определенной степени совершенства, создает технические системы "под себя – как себя". В процессе поиска оптимальных путей решения проблем надежности в технике одним из основных является вопрос о взаимосвязи структуры и функции. По особенностям структуры любой конкретной системы практически всегда можно сделать вывод о выполняемой ею функции. В основе надежного функционирования как биологических, так и технических систем лежат принципы структурной и функциональной избыточности: феномен избыточности, наблюдаемый в живой природе и моделируемый человеком в технических устройствах, является выражением единства структуры и функции.

Границы использования принципа избыточности устанавливаются с помощью экономических критериев, поскольку неосторожное использование этого принципа приводит к недопустимому увеличению размеров, веса, стоимости и других показателей, вследствие чего повышение надежности системы влечет за собой снижение других показателей технического уровня. Оптимизация количественных характеристик избыточности и надежности базируется, таким образом, на идеях, составляющих сущность категорий качества, количества и меры.

В основу анализа состояния технических систем в период их эксплуатации и старения исследователи используют термин "потенциал работоспособности", поскольку он несет более высокую смысловую нагрузку и дидактически наиболее адекватно соответствует энергетической сущности процессов старения. С этих позиций жизненный цикл технической системы (как и человека) можно представить как процесс непрерывного снижения потенциала работоспособности, периодически восстанавливаемого до приемлемого уровня путем проведения технических обслуживаний и ремонтных воздействий.

Снижение потенциала работоспособности машин, главным образом, связано с накоплением необратимых повреждений в их элементах. Повреждения могут иметь механическое, физическое, химическое происхождение или являться их комбинацией. Обычно повреждающие процессы, имеющие различную природу, рассматривают раздельно, несмотря на то, что в общем случае они описываются с позиций второго закона термодинамики одними и теми же или очень близкими математическими соотношениями. Общий подход к описанию процессов накопления повреждений предложен профессором В.В. Болотиным и является основой для использования в расчетах, связанных с прогнозированием долговечности технических систем.

Потенциал работоспособности технических систем условно складывается из трех частей: активной, пассивной и резервной.

Закономерности выработки активной части потенциала работоспособности являются предпосылкой и исходными данными для разработки системы технических обслуживаний и ремонтов.

Пассивная часть в пределах срока службы полагается неизменной. Резервная часть образуется в результате избыточности, закладываемой в конструкцию. На практике резервная часть образуется путем назначения различных коэффициентов запаса, использованием резервирования (дублирования) "ненадежных" элементов конструкции и т.д. Резервную часть потенциала работоспособности можно условно представить состоящей из двух частей:

первая часть формируется на базе "современного уровня незнания" свойств материалов, конструктивных связей, закономерностей старения;

вторая часть назначается для формирования живучести технической системы – обеспечения её работоспособности в течение определенного времени после выработки активной части потенциала работоспособности или отказов критического характера, точно так поступает и Природа, "проектируя" биосистемы.

С развитием эволюционной генетики явления наследственности стали рассматриваться не только как фактор эволюции, но и как объект эволюционных преобразований. Биологическая наука осмысливает проблему эволюции самих явлений наследования и процессов изменчивости. Применительно к техническим объектам степень наследования признаков определяется коэффициентом унификации, являющимся мерой конструктивной преемственности в процессе эволюции технических систем. Поскольку унификация в первую очередь предусматривает использование в новых моделях технических систем конструктивных элементов, узлов и агрегатов, используемых в существующих моделях, то прогнозирование показателей надежности новых моделей с высоким коэффициентом унификации существенно облегчается. Однако возможности человека, связанные с его огромной пластичностью и самокомпенсацией, способностью творчески изменять схемы действий, избирательной самообучаемостью и интуицией, дают ему такие преимущества, которые вряд ли будут достигнуты кибернетическими системами в обозримом будущем. Более того, совершенствование автоматизации управления не только не приводит к исключению человека из управленческих процессов, но, напротив, приводит к усложнению его труда, поскольку физические функции человека в процессе производства и управления все более уступают место социальным.

Технический объект оператор – сфера эксплуатации представляет собой части объективно существующего единого целого. Гораздо проще и удобнее рассматривать избирательно и изолированно один из элементов этой системы, тем более, что понятиями и категориями надежности можно охарактеризовать каждый элемент. Однако надежность системы в целом отличается от частных показателей надежности её элементов вследствие наличия корреляционных внутриэлементных, межэлементных и межсистемных связей, особенно когда в систему включен человек или человеческий коллектив, и решение таких задач является очень сложным, но вполне реализуемым процессом.