

В.В. Клюев, А.С. Фурсов, М.В. Филинов (ЗАО "НИИИИ МНПО "Спектр", Москва)

Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов

Проблемы определения и продления ресурса безопасной эксплуатации машин и конструкций в последние десятилетия приобрела исключительную актуальность во всех промышленно развитых странах. Для России важность их решения обусловлена снижением объемов производства для восполнения выводимых из эксплуатации машин и конструкций. Это в первую очередь касается объектов тепловой и ядерной энергетики, нефтегазопроводов, химической промышленности, наземного, надводного и воздушного транспорта, промышленного и гражданского строительства.

При этом *должны решаться следующие вопросы:*

- количественный анализ исходного, использованного и остаточного ресурсов как отдельных объектов, так и систем объектов;
- обоснование проектного, фактического и остаточного ресурсов;
- оценка состояния конструкционных материалов несущих элементов с учетом исходной технологической наследственности и возникающих эксплуатационных повреждений;
- определение характера, параметров, дислокации и размеров макро- и микродефектов в несущих элементах;
- расчетный и экспериментальный анализ напряженно-деформированных состояний несущих элементов;
- исследование механизмов естественного и ускоренного старения материалов и оборудования;
- оценка живучести материалов и элементов конструкций на разных стадиях повреждений;
- построение математической модели функционирования объекта и его подсистем для определения фактического состояния и остаточного ресурса;
- комплексная диагностика объекта для определения остаточного ресурса;
- предварительное и уточненное расчетно-экспериментальное определение остаточного ресурса.

При этом принципиально важно положение, что *остаточный ресурс должен определяться более высокой научно-методической точностью, чем проектный и исходный.*

Под *проектным* понимается теоретический ресурс, рассчитанный на основе данных о прочности мате-

риалов, математических моделей нагружения и т.д. Проектный ресурс должен считаться одинаковым для всех однотипных объектов.

Исходный ресурс – фактический ресурс объекта в начале эксплуатации. Исходный ресурс ниже проектного, так как в процессе производства на материал оказываются различного рода воздействия, обуславливающие возникновение скрытых дефектов. При этом из-за конечной надежности методов неразрушающего контроля такие дефекты могут остаться не обнаруженными. На исходный ресурс помимо состояния самого материала влияют также качество и метод сборки, человеческий и другие факторы. Исходный ресурс определяется после первого обследования объекта по окончании предпусковых испытаний перед вводом в эксплуатацию.

При проектировании машин и конструкций расчеты прочности проводят применительно ко всему спектру эксплуатационных режимов нагружения, включая предпусковые и периодические испытания, пуски-остановы, регулирование рабочих параметров и срабатывание систем аварийной защиты.

Для надлежащего обоснования прочности, ресурса и трещиностойкости требуется комплекс расчетов напряженно-деформированного состояния несущих элементов, включающий определение номинальных и максимальных напряжений, амплитуд этих напряжений, максимальных и минимальных температур эксплуатации, чисел циклов и времени эксплуатации.

Для подтверждения критериальных характеристик прочности, ресурса и трещиностойкости проводят комплекс аттестационных испытаний на стандартных, унифицированных или специальных лабораторных образцах. В тех случаях, когда создаются новые и ответственные конструкции, проводят испытания моделей с доведением их до предельного состояния – развитие недопустимой деформации, вязкое или хрупкое разрушение, образование и развитие трещин. При этом широко используют методы и средства дефектоскопии – ультразвуковой, рентгеновской, оптической, акустической и акустоэмиссионной, электромагнитной, термовизионной, голографической.

По результатам указанных испытаний решают две важные *практические задачи:*

– обоснование принятых расчетных схем, расчетных случаев, предельных состояний и запасов прочности;

– переход на новые, обычно пониженные запасы прочности.

В последнем случае предельно низкие запасы прочности обосновывают полномасштабными испытаниями в условиях, приближенных к штатным – по конструкционно-технологическим решениям и по представительному спектру эксплуатационных воздействий. Однако и при проведении таких испытаний запасы по местным напряжениям и деформациям рекомендуется иметь не ниже 1,15...1,25, а по ресурсу – не ниже 3...5.

На стадии эксплуатации машин и конструкций с учетом изменения состояния несущих элементов (механические свойства и дефектность) и накопления эксплуатационных повреждений проводят испытания отдельных узлов и всего изделия, определяют остаточную прочность, ресурс и трещиностойкость. Продлить ресурс безопасной эксплуатации можно с использованием всех запасов – по номинальным напряжениям, местным напряжениям и деформациям, трещиностойкости, времени и числу циклов.

Поскольку под ресурсом технической системы понимают ее наработку от начала эксплуатации до наступления предельного состояния, то понятие последнего допускает различное толкование в зависимости от выбранного критерия предельного состояния. При отсутствии макродефектов (типа трещин) предельное состояние определяется критическими величинами местных напряжений или деформаций с учетом зон концентрации напряжений и выделения характерных точек и величин напряжений. Введение в расчет по критериям статической, длительной и циклической прочности коэффициентов запаса по местным напряжениям и деформациям позволяет установить допускаемое с точки зрения безопасности суммарное повреждение нескольких режимов нагружения по времени, числу циклов и температуре и оценить ресурс безопасной эксплуатации, в том числе и при аварийных режимах. Следует отметить, что значительное влияние на накопление повреждений, а следовательно, и на ресурс оказывают как конструкционные факторы, включая концентраторы напряжений, так и технологические, определяемые механическими свойствами материала.

1. Общие вопросы построения диагностических систем для определения остаточного ресурса [2]

Основной принцип диагностики систем представляет собой:

1) последовательные и систематические измерения определенных параметров систем;

2) выявление изменений этих параметров в процессе эксплуатации и сравнение их с исходными;

3) прогнозирование изменения этих параметров.

С усложнением современной техники, повышением требований к ее надежности и недопустимости создания аварийных ситуаций, которые могут привести к катастрофе, увеличивается число контролируемых структурных параметров, а следовательно, необходимых измерительных средств.

Технические средства диагностики по характеру использования можно условно разделить на два класса: оперативные средства и средства диагностики, применяемые при изготовлении, профилактических осмотрах, ремонтах, технологических испытаниях, предпусковых испытаниях и т.д.

Средства могут быть аппаратными и программными. Персонал, средства и объект диагностирования, взаимодействующие между собой, образуют *систему диагностирования*.

При создании автоматизированной системы оперативной диагностики выполняют следующие этапы:

1) определяют необходимые иерархические уровни для каждого объекта диагностики;

2) определяют диагностические параметры каждого узла, входящего в объект диагностики;

3) определяют диагностические параметры, имеющие значение для всего объекта диагностики;

4) определяют оптимальный объем измерений диагностических параметров объекта диагностики;

5) определяют состав приборных систем диагностики, тип ЭВМ, математическое обеспечение работы системы;

6) решают задачу прогнозирования работоспособности объекта диагностики в реальном масштабе времени.

Для поиска дефектов и прогнозирования состояния объектов диагностики в целях устранения возможных аварий и катастроф требуется измерять большое число диагностических параметров.

Физические параметры разделяют на следующие группы: кинематические, геометрические, статические, динамические, тепловые, акустические, электрические и магнитные, механические, атомно-физические, а также основанные на молекулярных свойствах веществ, излучений. Измерение физических параметров положено в основу различных методов и средств технической диагностики, с помощью которых анализируется состояние объекта. *Наиболее существенными в практике технического диагностирования являются параметры надежности и живучести объекта, находящиеся в функциональной зависимости от измеренных значений, полученных при электромет-*

рии, виброакустике, дефектоскопии, структуроскопии, интроскопии, измерении механических свойств, состава вещества, размеров, скоростей, ускорений, сил, деформаций, давлений, температуры, времени, массы, влажности, расхода и уровня.

При выборе регистрируемых параметров следует учитывать:

- возможность контроля за нормальным функционированием механизмов и устройств технологического оборудования;
- предотвращение неправильных действий персонала и попадания внешних предметов на опасную зону технологической системы;
- контроль наиболее важных параметров внешней среды, влияющих на ход технологического процесса;
- контроль параметров, характеризующих напряженное состояние строительных конструкций производственных помещений (возникающих в ходе природных и техногенных катастроф);
- контроль параметров, обеспечивающих отсутствие персонала на объекте в случае аварии или при выполнении восстановительных работ.

К числу наиболее важных для обеспечения безопасности технологического оборудования параметров относятся: параметры движения, вибрации, точностные, тепловые, электрические усилия, моменты, давления, затрачиваемая мощность, напряжения в несущих конструкциях. Для *несущих конструкций рассчитываются параметры*, определяющие:

- прочность, жесткость и устойчивость (с применением методов сопротивления материалов);
- прочность и циклический ресурс, долговечность (с применением методов теории много- и малоциклового усталости);
- прочность и временной ресурс – долговечность (с применением методов теории ползучести и длительной прочности);
- динамическую прочность и ресурс (с применением методов динамики деформирования и разрушения);
- трещиностойкость (с применением методов линейной и нелинейной механики разрушения).

При выборе параметров учитываются помехозащищенность датчиков и обеспечение достаточной точности оценки аварийной ситуации.

Общий комплекс работ по определению исходного и остаточного ресурса сложных технических систем включает в себя поэтапное их рассмотрение для стадий проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации.

Под стадией эксплуатации подразумевают предпусковые испытания, физический пуск и выход на штатную эксплуатацию. На этой стадии подтверждаются принятые проектные решения и назначаются

методы оценки остаточного ресурса. При этом используется единая система критериев.

2. Задача оценки остаточного ресурса в процессе эксплуатации [2]

Если при анализе механизмов отказов на стадии эксплуатации конструкций, рассчитанных на длительные сроки службы, исключить отказы вследствие нерасчетных перегрузок, природных воздействий, ошибок при проектировании, ремонте или эксплуатации, то остальные случаи отказов можно отнести преимущественно к двум группам:

- образование и рост усталостных и коррозионно-усталостных трещин до опасных или недопустимых размеров;
- коррозия, приводящая к снижению толщин несущих элементов до опасных или недопустимых размеров.

Так, разрушение или повреждение в результате развития трещин является типичной формой предельного состояния сосудов давления – высоконагруженных объектов, наиболее широко эксплуатируемых почти во всех областях техники (в атомной и тепловой энергетике, на транспорте, в химической и нефтегазовой промышленности).

Одним из основных аспектов решения проблем безопасной эксплуатации оборудования, выработавшего значительную часть проектного срока эксплуатации или не имеющего расчетного срока эксплуатации, является дальнейшее совершенствование методологии оценки остаточного ресурса оборудования. Однако проблема усложняется тем, что формирование теории безопасности промышленных объектов характеризуется переходом от доминирующей ранее концепции "нулевого риска", базирующейся на нормативных коэффициентах надежности и безопасности, к концепции "приемлемого риска", согласно которой управление безопасностью, по сути дела, является управлением рисками.

Следует отметить, что значительный ресурс (рассчитанный при проектировании) можно трактовать как текущую величину, которая может уточняться в ходе эксплуатации по мере получения дополнительной информации об опыте фактической нагруженности.

Основной вопрос заключается в переназначении сроков службы на основе анализа состояния оборудования, дополнительных поверочных расчетов и оценки остаточного ресурса с учетом современных требований по безопасности. Базой для назначения нового (продленного) срока службы должно служить доказательство на стадии эксплуатации (т.е. с учетом уточненных данных) больших возможностей (долговечно-

сти, т.е. ресурса) по сравнению с оценками (т.е. проектным ресурсом), выполненными на основе консервативных моделей и характеристик на стадии проектирования.

В связи с этим возникает необходимость проведения большого объема исследований, связанных с изучением условий образования предельных состояний отказов объектов по критериям прочности, ресурса и надежности на разных стадиях эксплуатации. Наиболее эффективным научным подходом для предсказания и изучения нелинейного по своей сути поведения таких объектов является математическое моделирование, иначе – вычислительный эксперимент.

Математическое моделирование представляет собой методологию исследований сложных технических систем, широко использующую возможности современных ЭВМ и достижения прикладной математики. Оно не только эффективно дополняет традиционно применяемые расчетно-экспериментальные методы исследования, но и все чаще оказывается единственным подходом к прогнозированию возможности и последствий эксплуатации указанных систем (машин, конструкций) в экстремальных и аварийных условиях, когда другие методы или неприменимы, или не могут быть использованы по экономическим, экологическим и иным соображениям.

Основу такого подхода составляют математические модели наблюдаемых процессов, эффективные численные алгоритмы и пакеты программ. При этом физическое приближение исследуемых объектов, включающее в себя описание (параметризацию) конструктивных форм, поведения материалов и сред, а также разнообразных воздействий, является ключевым моментом моделирования. Особенно это касается выбора, обоснования и, если необходимо, последовательного уточнения моделей поведения материалов и сред на основании данных физического лабораторного эксперимента и доступных натуральных измерений.

Для успешного проведения вычислительного эксперимента требуется разработка специальных баз и банков данных, включающих в себя физико-механические свойства деформируемых и окружающих сред, характеристик сопротивления деформированию и разрушению конструкционных материалов, параметров уравнений состояния и уравнений их эволюции, в том числе для моделей континуальной механики повреждений, описания типовых деталей и узлов исследуемых объектов с возможными случаями нагружения и др.

Вместе с тем следует отметить, что сами нагрузки, действующие на деформируемое твердое тело, часто заранее неизвестны. Они возникают как результат

взаимодействия с другими телами, окружающими средами или физическими полями иной природы (тепловыми, радиационными, электромагнитными и пр.). Это приводит к необходимости постановки и решения задач, сложность которых усугубляется существенно нелинейным характером и различными временными и пространственными масштабами физических явлений, одновременно протекающих во взаимодействующих средах.

Результаты численного эксперимента могут быть использованы для оценки физического состояния и безопасности исследуемого объекта или прогнозирования остаточного ресурса. Проблемы обоснования безопасности в эксплуатации, прочности и ресурса объектов новой техники на основе численного моделирования представляют собой очень широкий и содержательный класс математических задач.

3. Построение математической модели функционирования объекта для определения его фактического состояния и остаточного ресурса

Исходя из сказанного, можно предложить следующую *схему построения системы определения остаточного ресурса*.

1. Задача построения систем оценки остаточного ресурса делится на две: построение системы для объекта на стадии проектирования и построение системы для объекта, уже находящегося в эксплуатации.

2. Для объекта на стадии проектирования и объекта, находящегося в эксплуатации, строятся математические модели износа. Для этого в обоих случаях определяются рекомендуемый режим работы, периодичность контроля, перечень технических параметров, характеризующих состояние объекта, а также набор средств контроля и измерений.

3. Для объекта на стадии проектирования строится математическая модель функционирования и износа, в частности, представляемая в виде дерева. При построении модели учитываются прочностные характеристики материалов; предполагаемые режимы работы (величина и распределение нагрузок во времени и т.п.) и условия эксплуатации (климатические условия, факторы коррозии и т.п.).

4. Для построения модели износа объекта, находящегося в эксплуатации, оценивается требуемая периодичность контроля по фактическому состоянию, вплоть до непрерывного мониторинга. Критериями могут являться: предельные значения некоторых физических параметров узлов и компонентов объекта; первоначальные данные о проектном ресурсе объекта с учетом срока и условий эксплуатации объекта; условия эксплуатации; статистические данные, получен-

ные в процессе эксплуатации однотипных технических систем и объектов; техническое состояние в текущий момент времени; мнение экспертов по эксплуатации и неразрушающему контролю.

Математическая модель оценки фактического состояния объекта строится и работает исходя из следующих условий и предположений [1, 2].

Имеющаяся на данный момент совокупность технических параметров (образующих пространство технических параметров) объекта зависит от того, какими эти параметры были в начале эксплуатации, от режима функционирования объекта и истории условий эксплуатации и режимов работы. Под условиями эксплуатации в данном случае следует понимать рабочие нагрузки, систематические и случайные факторы коррозии и т.п., которые, в общем, можно также назвать совокупностью разрушающих воздействий. Под режимом работы объекта подразумевается развертка во времени набора технических процессов, каждый из которых характеризуется совокупностью рабочих параметров. Изменение технических параметров объекта описывается уравнением состояния:

$$x(t) = F(x(t_0), u_{[t_0, t]}, K).$$

О совокупности технических параметров объекта судят по результатам прямых или косвенных измерений физических параметров. Совокупность результатов измерений зависит от соответствующих технических параметров объекта на момент измерений и условий, в которых проводились измерения. Данная стадия описывается уравнением измерений:

$$y(t) = G(x(t), u(t)).$$

По полученной совокупности измерений строится оценка истинных значений технических параметров объекта. Этот процесс описывается своим уравнением оценок:

$$\hat{x}(t) = H(y(t)).$$

Далее оценивается фактическое состояние объекта (вектор в пространстве состояний), о котором судят по совокупности оценок истинных значений технических параметров объекта, полученных в данных условиях [1]:

$$\Phi(t) = \Psi(\hat{x}(t), u(t)).$$

Остаточный ресурс объекта рассчитывается по построенной математической модели и определяется совокупностью оценок технических параметров объекта, уравнением состояния, условиями эксплуатации, фактическим состоянием объекта и совокупностью предельных технических параметров:

$$R(t) = W(t, \hat{x}(t), u(t), \bar{x}, \Phi(t)).$$

Тогда математическая модель системы оценки фактического состояния с последующим определением остаточного ресурса выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} x(t) = F(x(t_0), u_{[t_0, t]}, K), & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} y(t) = G(x(t), u(t)), & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \hat{x}(t) = H(y(t)), & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Phi(t) = \Psi(\hat{x}(t), u(t)), & (4) \end{cases}$$

$$R(t) = W(t, \hat{x}(t), u(t), \bar{x}, \Phi(t), K), \quad (5)$$

где (1) – уравнение состояния (может задаваться эволюционным или дифференциальным уравнением – детерминированным или стохастическим в зависимости от входящих в правую часть величин); (2) – уравнение измерений (стохастическое); (3) – уравнение оценок (детерминированное); (4) – уравнение оценки фактического состояния объекта (предполагает алгоритм отнесения объекта к некоторому классу, построенный на основе вероятностных методов); (5) – уравнение оценки остаточного ресурса (предполагает алгоритм прогнозирования с использованием уравнения (1)); $x(t)$ – вектор технических (диагностических) параметров; $u(t)$ – условия эксплуатации объекта в текущий момент времени; $u_{[t_0, t]}$ – условия эксплуатации объекта на промежутке времени $[t_0, t]$; K – вектор, характеризующий режим работы объекта; $y(t)$ – измерения при проведении контроля (прямые или косвенные) – случайная величина; $\hat{x}(t)$ – оценка вектора технического состояния (случайная величина); $\Phi(t)$ – оценка фактического состояния объекта на момент времени t ; $R(t)$ – оценка остаточного ресурса на момент времени t ; \bar{x} – предельные значения технических параметров.

При этом за t_0 в уравнении (1) при построении математической модели принимается момент начала эксплуатации объекта, а при определении остаточного ресурса – момент оценки технического состояния объекта. Для оценки остаточного ресурса фактически надо в уравнение (1) в качестве начальных условий подставить оценку $\hat{x}(t)$ из уравнения (3), в качестве эксплуатационных нагрузок – планируемые (например, условия, в которых объект функционировал до контроля), рассчитать траектории изменения технических параметров и, соответственно, промежутков времени, в течение которого ни один из технических параметров не достигнет своего предельного значения либо вектор фактического состояния не выйдет из допустимой области в пространстве состояний.

Данная модель строится для каждого существенно влияющего на ресурс компонента объекта. Остаточный ресурс всего объекта оценивается по компоненту в наихудшем состоянии.

Поскольку измерения при проведении контроля являются случайными величинами, то описанную модель нельзя считать полностью детерминированной, поэтому необходимо математическое описание статистических закономерностей измерений и их связей с показателями состояния объекта контроля для оценки фактического состояния этого объекта. По сути, оценка истинных значений технических параметров в соответствии с уравнением (3) является задачей распознавания состояния, в котором находится объект контроля, для решения которой может быть применен вероятностный подход [3].

Необходимо заметить, что, выбирая нужным образом функцию $u(t)$ (условия эксплуатации) и вектор K (параметры функционирования) в уравнении (1), можно управлять изменением технических параметров, а следовательно, остаточным ресурсом.

При построении системы оценки остаточного ресурса при проектировании нового (в особенности сложного) объекта в него необходимо ввести средства мониторинга текущего состояния в наиболее критических точках (в расчетных местах концентрации напряжений, известных на примере построенных ранее и уже находящихся в эксплуатации объектов, в возможных центрах возникновения коррозии и т.п.).

При невозможности введения средств мониторинга необходимо конструктивно предусмотреть доступ к критическим точкам для осуществления плановых диагностических мероприятий.

Следует также конструктивно предусмотреть доступ для проведения периодических исследований "немониторинговыми" методами, существенно дополняющими картину фактического состояния объекта, например, капиллярной и магнитопорошковой дефектоскопии, металлографии, радиографии.

Средства непрерывного мониторинга объекта должны иметь средства передачи данных для организации сети и подключения ее к серверу обработки данных. При этом наиболее целесообразной представляется организация беспроводных сетей, менее зависящих от внешних условий и более надежных, чем обычные проводные.

Средства определения фактического состояния и оценки остаточного ресурса котлов и трубопроводов

Описанный подход к построению системы определения фактического состояния и оценки остаточного ресурса предполагает ведение истории эксплуатации объекта, измерение и мониторинг достаточно большого количества диагностических параметров, передачу полученных данных, их обработку и интерпретацию. Все это требует больших затрат времени и средств, т.е. в результате получится достаточно дорогостоящая система, хотя и позволяющая избежать не-

соизмеримых с ее стоимостью убытков от техногенных катастроф.

Однако в настоящее время срочная потребность в средствах, с помощью которых можно быстро определить фактическое состояние объекта и хотя бы грубо оценить остаточный ресурс, становится все более ошутимой.

В связи с этим *предлагается подход и набор средств*, сочетающий в себе:

- преимущества многопараметрической диагностики;
- простоту использования;
- модульность и возможность наращивания;
- приемлемую цену.

Для определения фактического состояния и оценки остаточного ресурса металлоконструкций предлагается одновременно оценивать несколько существенных для остаточного ресурса характеристик материала объекта: характерные параметры структуры металла (например, балл зерна), интегральные параметры материала, связанные с прочностью (например, твердость), наличие и характер макродефектов, степень коррозионного износа металла.

Предельные значения выбранных диагностических параметров определяются существующими стандартами или техусловиями.

Динамику изменения диагностических параметров можно отслеживать и моделировать на основе данных периодических обследований объекта контроля. Например, используя изображения металлографических структур, полученных с установленной периодичностью, можно составить металлографический атлас, с помощью которого возможно оценивать динамику изменения свойств материала (например, развитие ползучей деформации), определяющих остаточный ресурс. С помощью остальных параметров диагностики ресурс уточняется.

Пространство диагностических параметров разбивается на области с учетом скорости изменения каждого из параметров, при этом определяются критические области. Состояние объекта контроля связывается с точкой в пространстве параметров. Изменение состояния объекта характеризуется траекторией, показывающей его движение в пространстве параметров. Попадание траектории в критическую область свидетельствует об аварийном состоянии объекта контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Надежность** и эффективность в технике. Т. 8 / под ред. В.И. Кузнецова, Е.Ю. Барзиловича. М.: Машиностроение, 1990.
2. **Безопасность** России. М.: МГФ "Знание", 1998.
3. **Малайчук В.П., Мозговой А.В.** Математическая дефектоскопия. Днепропетровск: Системные технологии, 2005.