

мальная из частот источников, присутствующих в моделируемой системе.

Добавится также блок стека и в список базовых блоков в системе. В простейшем случае его описание на языке Erlang будет выглядеть так (глубина стека здесь равна 10):

```
stack(Server_Node) ->
    receive
    stop ->
        exit(normal);
    {pin1, signal1_type, signal1} ->
        signal1_type -> signal1_type, signal2_type,
        signal1_type
        delay(signal1, 10) -> signal
    {modeling, Server_Node}!{self(), output1, 1,
        signal1_type, signal1}end.
```

С помощью этих улучшений планируется реализовать систему моделирования переходных процессов для силовых электронных схем, работающих, в частности, с большим количеством электронных ключей

(повышающие импульсные источники питания с ШИМ) и высокой мощностью.

Библиографические ссылки

1. Хайнеман Р. PSpice. Моделирование работы электронных схем : пер. с нем. М. : ДМК-Пресс, 2001.
2. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
3. Богданов К. В., Ловчиков А. Н. Архитектура EDA-системы на основе конкурирующих параллельных процессов // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 4. С. 63–67.
4. Богданов К. В., Ловчиков А. Н. Построение EDA-системы на основе синхронизированных параллельных процессов // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 58–61.
5. Open Source Erlang [Электронный ресурс]. 2008. URL: <http://www.erlang.org/>. (date of visit: 12.11.2012).
6. Armstrong J. Programming Erlang: Software for a Concurrent World. Pragmatic Bookshelf, 2007.

K. V. Bogdanov, A. N. Lovchikov

SIMULATION OF SYSTEMS WITH ESSENTIAL NONLINEARITY WITH THE HELP OF PARALLEL PROGRAMMING

The authors suggest a new approach to EDA-systems designed to simulate circuits containing elements, functioning of which is related with abrupt change of parameters and in the process of mathematical description leads to substantial increase of derivatives of state variables, that in the process of traditional modeling leads to breakdown of the computational process.

Keywords: electronic devices, computing algorithms, CAD-systems, EDA-systems.

© Богданов К. В., Ловчиков А. Н., 2012

УДК 621.45.017

А. Е. Буров

ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКЦИИ КРЕПЛЕНИЯ КРЫШКИ ГИДРОТУРБИНЫ В АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ*

Рассмотрены подходы к количественной оценке живучести конструкций технических систем. Представлены результаты анализа живучести конструкции разъемного соединения крышки турбины гидроагрегата в условиях аварийной ситуации при прогрессирующем разрушении несущих элементов. На основе моделирования напряженно-деформированного состояния определены показатели живучести в зависимости от числа отказавших элементов.

Ключевые слова: разъемное соединение, напряженно-деформированное состояние, разрушение, живучесть.

Традиционные методы проектирования конструкций предполагают исключение возникновения предельных состояний несущих элементов при проектных нагрузках. Однако отказы, разрушения и аварийные ситуации неизбежны практически для любой технической системы. Стало быть, существующий

подход не отвечает современным требованиям обеспечения безопасности, которые предполагают изучение работоспособности конструкций с учетом запроектных нагрузок и воздействий. Неотъемлемой частью такого анализа является определение параметров живучести несущих конструкций.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 11-08-00945).

Под живучестью понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов [1]. В настоящее время концепция живучести конструкций технических систем находится в стадии теоретической проработки: практически нет моделей живучести, апробированных на реальных объектах и основанных на фундаментальных представлениях о природе и механизмах развития повреждений; не существует общепринятых методик проектирования конструкций на живучесть; не определены критерии и количественные показатели живучести, а также их нормативные значения. На обоснование и разработку последних направлены значительные усилия исследователей разных стран [2–7].

В качестве базовых параметров, характеризующих живучесть как свойство конструкции сохранять работоспособное состояние при отказе одного или нескольких ее элементов, могут быть использованы индикаторы жесткости, прочности, ресурса, надежности и риска. В последнее время был предложен ряд индексов, среди которых можно выделить три основные группы. Они приведены ниже с указанием примеров предложенных индексов [2; 5; 6].

1. Показатели на основе риск-анализа, учитывающие вероятность возможного аварийного воздействия и его последствия-ущерб. Ущерб подразделяется на прямые, т. е. следующие непосредственно от иницирующего воздействия, и косвенные – возникающие в результате развития аварийной ситуации. Анализ начинается с идентификации и моделирования воздействий, которые потенциально могут привести к возникновению поврежденных конструктивных элементов. В качестве таковых могут выступать экстремальные нагрузки, взрывы, ошибки в проектировании или эксплуатации, а также процессы, ведущие к деградации свойств материалов или потере эксплуатационных качеств, например коррозия или усталость. Затем определяются возможные сценарии развития аварийной ситуации при различных исходных повреждениях.

Для одного стартового события индекс живучести можно определить в виде

$$G_R = \frac{R_{\text{пр}}}{R_{\text{пр}} + R_{\text{кос}}}, \quad (1)$$

где риски $R_{\text{пр}}$ и $R_{\text{кос}}$ – произведения вероятности события и его последствия.

Индекс изменяется от 0 до 1 с большими значениями, соответствующими более живучим конструкциям, т. е. тем, для которых косвенные риски не вносят значительного вклада в общий риск. Данный показатель определяет только относительный вклад

рисков, не оценивая при этом абсолютную величину прямого риска. Это может привести к выводу о высокой живучести системы, для которой значения прямых рисков намного больше косвенных. Очевидно, что надежность такой системы будет низкой. Следует отметить трудность в вычислении G_R , связанную со сложностью адекватного определения вероятности возникновения события риска. Однако эта процедура упрощается для заданного воздействия, для которого вероятность равна 1. В этом случае индекс живучести определяется только величинами прямых и косвенных ущербов.

2. Вероятностные показатели, основанные на соотношении показателей надежности неповрежденной конструкции и ее надежности при наличии локальных повреждений. Для этого используется функция предельного состояния

$$V = f(x_1, \dots, x_n) = R - S \geq 0,$$

где R и S – несущая способность (сопротивление) и нагрузка соответственно; x – вектор случайных переменных системы. Предельная поверхность разделяет два состояния – безопасное $V > 0$ и отказ $V < 0$.

Если за меру надежности принять вероятность разрушения $P_F = P(V < 0)$, то

$$G_P = \frac{P_{\text{пов}} - P_{\text{неп}}}{P_{\text{неп}}},$$

где $P_{\text{неп}}$ и $P_{\text{пов}}$ – вероятность разрушения неповрежденной и поврежденной конструкции соответственно.

Индекс G_P варьируется от 0 до бесконечности, при этом для конструкций, обладающих высокой живучестью, $G_P \rightarrow 0$. Данный показатель трудно использовать на практике из-за трудности вычисления P_F , а также широкого диапазона возможных значений, что осложняет сравнительный анализ проектных решений.

Этот недостаток преодолевается при использовании индекса надежности β , который напрямую связан с вероятностью разрушения: $\beta = \Phi^{-1} \cdot (P_F)$, Φ^{-1} – функция, обратная нормированной функции Лапласа (рис. 1). В простом случае, когда несущая способность и нагрузка нормально распределены и независимы,

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}},$$

где μ_R , σ_R и μ_S , σ_S – среднее значение и стандартное отклонение для R и S соответственно. Индекс надежности также определяется аналитически, если случайные переменные сопротивления и нагрузки соответствуют логнормальному распределению.

Мерой живучести служит отношение показателей надежности конструкции в поврежденном $\beta_{\text{пов}}$ и неповрежденном $\beta_{\text{неп}}$ состояниях:

$$G_\beta = \frac{\beta_{\text{пов}}}{\beta_{\text{неп}}}. \quad (2)$$

Значения индекса G_β изменяются от 0 до 1, и конструкция обладает абсолютной живучестью при $G_\beta = 1$.

3. Детерминированные показатели на основе сравнения параметров (силовых, жесткостных, энергетических и т. д.) конструкции, характеризующих неповрежденное и поврежденное состояния.

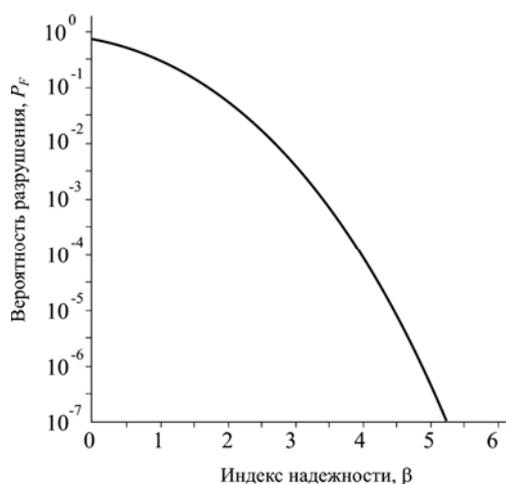


Рис. 1. Соотношение между значениями вероятности разрушения и индекса надежности

В качестве такого параметра может выступать, например нагрузка, вызывающая разрушения. Тогда индекс живучести определяется как соотношение предельной нагрузки для поврежденной и исходной конструкций:

$$G_L = \frac{L_{пов.}}{L_{неп.}} \quad (3)$$

Конструкция считается живучей при $G_L \rightarrow 1$. Данный показатель характеризует в большей степени способность конструкции перераспределять внешнюю нагрузку после отказа одного или нескольких элементов, т. е. так называемую резервирующую способность. Были предложены другие подобные индексы живучести, основанные на сравнении матриц жесткости конструкции без и с наличием отказавших элементов. Принципиальный недостаток такого подхода в качестве меры оценки живучести заключается в том, что при этом не учитывается стохастическая природа характеристик механических свойств материалов и внешних нагрузок.

В качестве объекта анализа живучести использовалась конструкция разъемного соединения крышки турбины РО230/833-В-677 со статором гидроагрегата. Крепление крышки к верхнему поясу статора производится через фланцевый разъем 80 шпильками М80, выполненными из стали с модулем Юнга $E = 205$ ГПа, пределом текучести $\sigma_{02} = 275$ МПа и временным сопротивлением $\sigma_b = 530$ МПа. На крышку действуют циклические гидравлические нагрузки и статическая весовая нагрузка от узлов гидроагрегата. Кроме того, крепежные элементы воспринимают усилия предварительного затяга, соответствующие номинальным напряжениям 120 МПа [8].

Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) соединения в условиях предполагаемой аварийной ситуации выполнено методом ко-

нечных элементов (МКЭ) с помощью программного комплекса ANSYS. Учитывая несимметричность геометрии и схемы приложения нагрузок, создавалась полная твердотельная модель конструкции. Модель на основе 20-узловых объемных конечных элементов представлена на рис. 2 (для ясности показана только половина модели). Для определения размера конечных элементов выполнялся ряд предварительных расчетов. В качестве кинематических граничных условий принималось «жесткое» крепление крышки к статору. Усилие затяжки шпилек моделировалось с помощью элементов предварительно нагруженного соединения. Модель состоит из около 400 000 элементов и 700 000 узлов. Определение параметров надежности для соединения осуществляли средствами подсистемы Probabilistic Design, реализующей метод Монте-Карло.

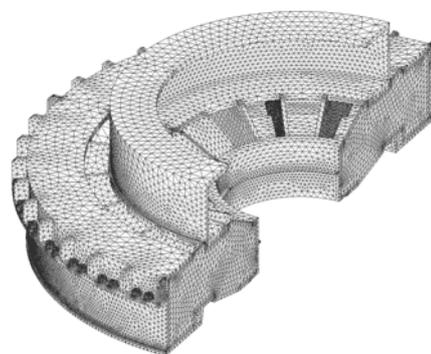


Рис. 2. Конечно-элементная модель разъемного соединения

Первоначально расчет НДС выполнялся при полном наборе крепежных элементов. Для этого случая максимальные эквивалентные напряжения в шпильках составляли порядка 144 МПа. Усилие, действующее на шпильки, определялось как сумма реакций в узлах, расположенных на закрепленном сечении.

В качестве развития аварийной ситуации рассматривалось выключение из работы (например, в результате усталостного разрушения) отдельных шпилек. Отказ элемента приводит к перераспределению внутренних усилий на оставшиеся структурные компоненты. Как следствие, если уровень перегрузки окажется достаточно большим, могут разрушиться другие элементы и серия последовательных локальных разрушений приведет к потере несущей способности всей системы. Предельным для шпилек принималось напряжение текучести. Учитывая, что количество возможных вариантов эскалации аварийной ситуации при разрушении отдельных элементов оказывается достаточно большим, расчеты проводились для наиболее короткого сценария, в котором разрушение соединения наступает при минимально возможном количестве отказавших несущих элементов – последовательном разрушении соседних шпилек.

В результате расчетов были определены поля напряжений и деформаций, действующие в крышке и крепежных элементах. О характере НДС конструкции можно судить по коэффициенту перегрузки, рассчи-

танному как отношение усилия в конкретной шпильке к его номинальному значению, без учета концентрации. Этот параметр показывает, как нагрузка от отказавших шпилек перераспределяется на элементы, сохранившие работоспособность. Значения этого параметра в окружном направлении от крайней разрушенной шпильки представлены на рис. 3 для разных стадий развития аварийной ситуации (числа отказавших элементов). Как следует из рисунка, перераспределение нагрузки происходит неравномерно, в основном на несколько ближайших несущих элементов. Поле возмущения номинального напряженного состояния ограничивается 8–10 рядами шпилек. При этом за счет возникновения изгибающего момента возможны случаи, когда усилия в шпильках 4–6 ряда меньше усилий в шпильках, расположенных вдали от отказавших элементов. Такой локальный характер перераспределения силового потока возникает за счет деформирования фланца крышки турбины.

При удалении из расчетной схемы 13 шпилек напряжение в близлежащих шпильках возрастает до уровня, превышающего предельное значение. Это ведет к каскадным отказам и катастрофическому разрушению соединения в целом.

Полученные характеристики НДС были использованы в расчетах индекса живучести G_B на основе подхода (2), значения которого для четырех комбинаций параметров нормального распределения несущей способности и нагрузки представлены на рис. 4, слева. Как и следовало ожидать, величина разброса характеристик сопротивления и нагрузки, определяющих функцию предельного состояния (1), оказывает существенное влияние на индекс живучести. Отметим, что

живучесть конструкции практически не меняется вплоть до отказа шести шпилек.

Функция живучести G_L , определенная по выражению (3), представлена на рис. 4 справа. По сравнению с вероятностным показателем, индекс G_L реагирует даже на незначительные локальные повреждения, снижаясь более чем на 20 % при шести разрушенных шпильках. На рисунке для сравнения пунктирной линией приведены значения G_L в случае, когда нагрузка после отказа элемента перераспределяется равномерно на оставшиеся несущие элементы.

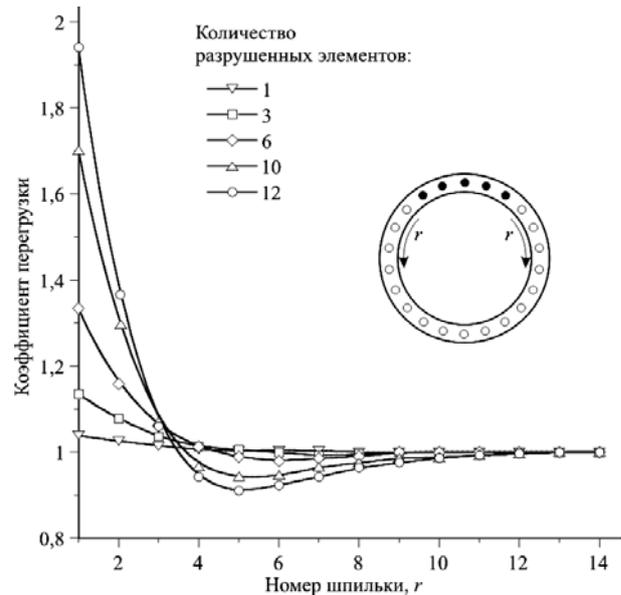


Рис. 3. Распределение коэффициента перегрузки на шпильки, соседние с разрушенными

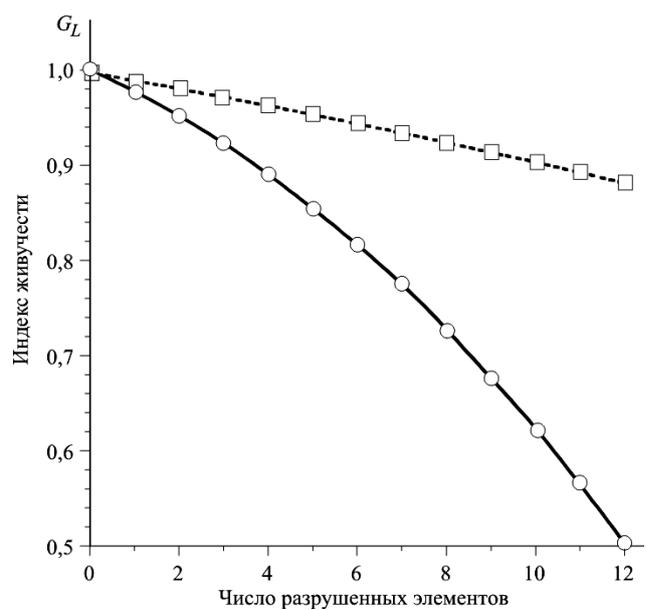
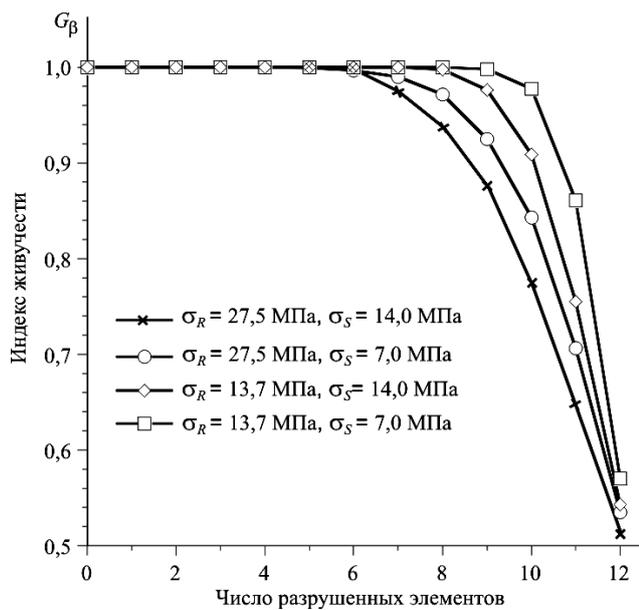


Рис. 4. Живучесть разъемного соединения как функция числа разрушенных шпилек: на основе показателей надежности (слева); на основе детерминированного подхода (справа)

Таким образом, на основе моделирования аварийной ситуации, вызванной разрушением несущих элементов разъемного соединения крышки гидроагрегата, определены количественные показатели живучести на базе вероятностного и детерминированного подходов. Индексы живучести, характеризующие устойчивость конструкции к локальным повреждениям и катастрофическому разрушению, могут быть использованы при проектировании конструкций технических систем, а также для разработки технических мероприятий, направленных на повышение безопасности.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 2002.

2. Махутов Н. А., Петров В. П., Резников Д. О. Оценка живучести сложных технических систем // Пробл. безопасности и чрезвычайных ситуаций : науч. информ. сб. 2009. № 3. С. 47–66.

3. Baker J. W., Schubert M., Faber M.H. On the assessment of robustness // J. Structural Safety 2007. Vol. 30. P. 253–267.

4. Robust design – A concept for imperfection insensitive composite structures / M. C. W. Lee, Z. Mikulik, D. W. Kelly et al. // Composite Structures. 2010. Vol. 92. P. 1469–1477.

5. Starossek U., Haberland M. Approaches to measures of structural robustness // Structure and Infrastructure Engineering. 2011. Vol. 7. P. 625–631.

6. Sorensen J. D. Framework for robustness assessment of timber structures // Engineering Structures. 2011. Vol. 33(11). P. 3087–3092.

7. Назаров Ю. П., Городецкий А. С., Симбиркин В. Н. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 4. С. 5–9.

8. Махутов Н. А., Москвичев В. В., Лепихин А. М. Оценка ресурса резьбовых соединений крепления крышки гидротурбины // Пробл. безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2011. № 4. С. 33–39.

A. E. Burov

ASSESSMENT OF TENACITY OF HYDRO-TURBINE LID FIXTURE IN A CASE OF EMERGENCY

The author considers the existing approaches to quantitative assessment of technical system structures. The results analysis of tenacity of detachable connection of hydro-turbine lid in a case of emergency, at progressive failure of load-carrying elements, are presented. The indexes of tenacity versus the number of failed elements are defined, on the basis of stress-strain state modeling.

Keywords: detachable connection, stress-strain state, failure, robustness.

© Буров А. Е., 2012

УДК 621.396.96.001(07)

Е. Л. Вайтекунене

МОДЕЛЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ ПРИ МУЛЬТИВЕРСИОННОМ ФОРМИРОВАНИИ ПРОГРАММНО-ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО РЕСУРСАМ

Рассматривается модель использования ресурсов при мультиверсионном формировании программно-информационных технологий для распределенных систем с учетом ресурсной базы и ограничений на время выполнения.

Ключевые слова: мультиверсионный программный комплекс (МПК), вектор конфигурации МПК.

На современном этапе развития вычислительной техники и широкого применения систем управления и обработки данных в ключевых областях большое значение придается надежности программного обеспечения (ПО). Одним из самых распространенных подходов к реализации программной отказоустойчивости является методология избыточности. Методология мультиверсионного программирования, как один из

подходов к реализации идеи введения избыточности в структуру системы программного обеспечения, на практике доказала свою эффективность. С использованием данной методологии были реализованы программные комплексы систем управления летательными аппаратами, атомными электростанциями и т. п. Однако такой метод ведет к увеличению стоимости системы, в которой он применяется.