

УДК 004.942

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ЖИВУЧЕСТИ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Доронин Сергей Владимирович

к.т.н., доцент, в.н.с., e-mail: sdoronin@ict.nsc.ru,

Филиппова Юлия Федоровна

к.т.н., н.с., e-mail: filippovajf@ict.nsc.ru,

Красноярский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий», 660049 г. Красноярск, пр. Мира, 53.

Аннотация. Рассматриваются структура и содержание цифровых моделей живучести на примере стержневых конструкций. Разработаны функциональная и процедурная модели анализа живучести, выполнен численный анализ повреждаемого объекта с оценкой показателей живучести. Специфической чертой цифровых моделей живучести является то, что в основу дискретизации пространства входных данных и результатов предлагаются сценарии накопления повреждений в стержневых конструкциях.

Ключевые слова: цифровая модель, живучесть, стержневые конструкции, сценарии.

Цитирование: Доронин С. В., Филиппова Ю.Ф. Цифровые модели живучести для поддержки жизненного цикла стержневых конструкций // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 2 (22). С. 21-31. DOI:10.38028/ESI.2021.22.2.002

Введение. В настоящее время наблюдается лавинообразный рост публикаций, касающихся построения и использования цифровых моделей в различных областях науки и техники. Традиционная область интересов авторов – анализ живучести технических объектов, основываясь на обобщенной формулировке понятия живучести (ГОСТ 15.016-2016), под живучестью стержневых конструкций понимаем их свойство сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов и повреждений определенного вида. Актуальность этой области знаний обусловлена большой распространенностью стержневых конструкций в технике, значительным количеством их разрушений, в том числе катастрофического характера. Опыт анализа таких разрушений показывает, что их предпосылки развивались в течение некоторого времени вследствие последовательного повреждений отдельных структурных элементов и связей между ними.

В рассматриваемой области знаний цифровые модели отсутствуют полностью. Одна из причин этого – неясность в формулировке возможных сценариев разрушения элементов и связей в структурно сложной стержневой системе. Кроме того, построение цифровых моделей требует конкретики, предполагает работу с массивами данных. Однако в области практического анализа живучести мало конкретных работающих моделей, отсутствует систематизация накопленных результатов в цифровой форме.

В связи с этим актуальной является разработка предметной области практического анализа живучести с учетом современных тенденций широкого внедрения цифровых технологий в научную и инженерную деятельность. При этом, в отличие от хорошо разработанных предметных областей, имеющих большую историю развития и значительное количество накопленных результатов, практический анализ живучести не требует цифровой трансформации: создавая предметную область фактически с зачаточного состояния, возможно и необходимо сразу делать это с позиций формирующегося мировоззрения информационного общества. В настоящей работе на примере одного из широко распространенных классов технических объектов – пространственных стержневых

конструкций – рассматривается ряд аспектов практического создания цифровых моделей живучести.

1. Информационные предпосылки создания цифровых моделей живучести.

Идеология построения и использования цифровых моделей естественным образом основывается на информационных технологиях, использовавшихся первоначально при автоматизированном проектировании технических объектов, а затем распространенных и на остальные стадии жизненного цикла. К таковым преимущественно относятся CALS- и PLM-технологии.

CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий), или ИПИ (информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий) – подход к проектированию и производству высокотехнологичной и наукоёмкой продукции, заключающийся в использовании компьютерной техники и информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Управление жизненным циклом изделия включает в себя широкий круг задач, решаемых в процессе проектирования, изготовления, эксплуатации и утилизации. Наибольшее количество задач приходится решать на стадиях проектирования и изготовления. Разработка современных изделий проводится в едином информационном пространстве, поддерживающем жизненный цикл при помощи компьютерных технологий, обозначаемых обычно аббревиатурой PLM (Product Lifecycle Management – управление жизненным циклом).

CALS- и PLM-технологии в настоящее время поддерживаются большим количеством международных стандартов. Все эти технологии и стандарты – предшественники и предпосылки построения цифровых моделей живучести. Принципиальная новизна таких моделей заключается в том, что оцифровываются характеристики конструкций в поврежденных состояниях.

Общие требования к цифровым моделям живучести включают в себя интеграцию с идеологией CALS/PLM и ориентацию на международные стандарты в области информационных технологий.

2. Многоуровневая система моделей анализа живучести стержневых конструкций.

Функциональная модель анализа живучести стержневых конструкций в форме графической нотации IDEF0 сформулирована на базе их системной декомпозиции и учитывает требования современных информационных технологий и системной инженерии, интегрированных в CALS/ИПИ-технологиях. Модель определяет полный перечень необходимых действий эксперта-исследователя для получения оценочных характеристик живучести конструкции в целом и составляющих ее подсистем. Кроме того, она декларирует содержание входной и выходной информации, информационные взаимосвязи между элементами функциональной модели. Сформулированная функциональная модель определяет основное содержание процедур и моделей практического анализа живучести [1].

Исходя из функциональной модели, предлагается многоуровневая система процедурных моделей анализа живучести (рис. 1), которая включает три иерархических уровня моделей анализа: структурной живучести M_{Str} , живучести узла сочленения M_J , живучести повреждаемых стержневых элементов M_B .

Рассмотрим соотношение разработанных моделей с функциональной моделью анализа живучести [1]. Выходы функциональной модели нашли свое отражение в следующих моделях анализа живучести:

- модели поврежденных состояний – $M_{Jc}, M_{Ji}, M_{Ba}, M_{Bn}, M_{S1}, M_{Sm}$;

- характеристика прочности и разрушения поврежденных элементов – M_{Ba}, M_{S1}, M_{Sm} ;
- модели внешних нагрузок и воздействий – $M_{Bn}, M_L, M_{Se}, M_{comb}$;
- внутренние силовые факторы в элементах соединения – M_{Jc}, M_{S0} ;
- возможные сценарии накопления повреждений в соединении – M_{Ji}, M_{Jc} ;
- реализуемые сценарии накопления повреждений и разрушения соединений – M_{Jc} ;
- сценарии повреждения и разрушения структуры при внешних нагрузках и воздействиях – M_{S1}, M_{Sm} ;
- траектории развития повреждений структуры, лимитирующих ее живучесть – M_{Sm} ;
- модели экстремальных, аварийных, запроектных нагрузок и воздействий – M_L ;
- конструктивный отклик на экстремальные, аварийные, запроектные нагрузки и воздействия – M_{comb}, M_{Se} .

Разработанная система моделей полностью соответствует всем выходам функциональной модели анализа конструкционной живучести.



Рис. 1. Иерархия моделей анализа живучести стержневых конструкций:

M_{Sys} – конструкции; M_{Str} – структуры (M_{S0} – неповрежденной, M_S – поврежденной, M_{S1} – с одним поврежденным элементом, M_{Sm} – с m поврежденными элементами);
 M_J – узла сочленения (M_{Ji} – информационная, M_{Jc} – вычислительная);
 M_B – стержневого элемента (M_{Ba} – аналитическая, M_{Bn} – численная); M_{Sup} – в связи с системными взаимодействиями (M_L – анализа расчетных случаев нагружения, M_{comb} – неблагоприятного сочетания взаимного положения элементов, M_{Se} – при нештатном взаимодействии с системным окружением)

Иерархически организованная система моделей анализа живучести (рис. 1) объединяет информационные, вычислительные, аналитические, численные модели анализа живучести стержневых элементов, узлов их сочленения, стержневых структур в поврежденном и неповрежденном состоянии.

Конкретизация и практическая апробация ряда этих моделей выполнена для стержневых конструкций оборудования цифрового телерадиовещания и спутниковой связи [2-4], для рабочего оборудования карьерного экскаватора [5, 6], для токопроводов с литой изоляцией [7, 8], для узла сочленения стержневого каркаса рефлектора [9-12].

В настоящей работе с позиций построения цифровой модели живучести рассматривается реализация модели M_{Sm} – анализа живучести стержневой структуры с m поврежденными элементами.

3. Структура цифровой модели живучести. Цифровые модели живучести строятся на основе сценариев накопления повреждений различной степени тяжести. Известны [13] три принципиально различных подходов к определению сценариев, отличающиеся тем, что каждый последующий шаг разрушения обусловлен:

- состоянием поврежденности (накопленным уровнем повреждений), определенным предыдущими шагами (преимущественно внутренним состоянием системы) – вариант I;
- гипотетической последовательностью событий, определяемой по результатам анализа произошедших или предполагаемых возможными авариями и разрушениями (преимущественно внешними воздействиями на систему) – вариант II;
- предварительными соображениями о вкладе различных функциональных групп структурных элементов конструкции в формирование ее запаса живучести – вариант III.

Вариант I подхода к определению сценариев наиболее индивидуализирован. Он позволяет исследовать поведение повреждаемой конструкции при строго детерминированном наборе параметров, характеризующих конкретный экземпляр технического объекта и условия его работы. Вариант II дает возможность сосредоточить внимание на анализе привносимых извне факторов и событий. Вариант III является наиболее общим и направлен на выявление наиболее уязвимых структурных элементов и групп элементов, включаемых в общую силовую схему конструкции, а также на проведение качественного сравнительного анализа вариантов конструктивных схем.

Тогда сценарно ориентированная структура цифровой модели в общем виде выглядит следующим образом. Рассматриваются несколько сценариев, для каждого из которых определяется некоторая последовательность шагов. На каждом шаге каждого сценария с позиций живучести конструкция характеризуется набором параметров $\{P\}$ – чисел, характеризующих отклик на наличие повреждения. Набор параметров $\{P\}$ – цифровая модель живучести для конкретного шага конкретного сценария, а в целом цифровая модель живучести представляется массивом данных следующей структуры (табл. 1).

Таблица 1. Структура цифровой модели живучести

N сценария	Шаг сценария				
	1	2	3	...	K
1	$\{P\}_{11}$	$\{P\}_{12}$	$\{P\}_{13}$...	$\{P\}_{1K}$
2	$\{P\}_{21}$	$\{P\}_{22}$	$\{P\}_{23}$
3	$\{P\}_{31}$	$\{P\}_{32}$	$\{P\}_{33}$
...
L	$\{P\}_{L1}$	$\{P\}_{L2}$	$\{P\}_{L3}$...	$\{P\}_{LK}$

Здесь L – включаемое в модель количество сценариев, K – максимальное количество шагов сценария (оно чаще всего оказывается различным для L сценариев).

4. Численный пример – цифровая модель живучести стержневого каркаса прецизионного рефлектора параболической антенны наземных систем спутниковой связи. Рассмотрим построение цифровой модели живучести силового каркаса крупногабаритного прецизионного рефлектора наземных систем спутниковой связи Q/K_a -частотного диапазона (рис. 2). Диаметр рефлектора составляет 12 м. Каркас представляет собой пространственную стержневую конструкцию из полимерных композиционных материалов. Стержни представлены трубами квадратного поперечного сечения 60×60 мм. Используются два варианта толщины стенки труб: на периферии 1,4 мм, в области ступицы 2,8 мм. Соединение труб осуществляется с использованием фитингов (толщина стенки 2,8 мм) посредством болтовых и клеевого соединений.



Рис. 2. Общий вид рефлектора и строение каркаса рефлектора

Конечно-элементная модель построена с использованием одномерных балочных (каркас), двумерных оболочечных (сегменты зеркала) и трехмерных (детали ступицы) конечных элементов. Модель содержит порядка 2,25 миллионов узлов и 960 тысяч элементов. Размерность модели обусловлена исследованием сходимости результатов (расчетных напряжений и деформаций) по сетке конечных элементов.

Прецизионность применительно к рассматриваемому объекту означает наличие специальных требований по точности обеспечения функциональных характеристик на всех стадиях жизненного цикла. Такие функциональные характеристики будем называть параметрами (параметром) прецизионности.

Требования к прецизионности антенны обусловлены частотным диапазоном ее функционирования: с увеличением частоты резко возрастают требования к жесткости и геометрической стабильности поверхности зеркала.

При работе на частоте f_z соответствующая длина радиоволны определяется как

$$\lambda_r = \frac{c}{f_z}, \quad (1)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме (скорость света).

Максимальное линейное отклонение фактической формы элементов зеркала от теоретической по нормали к ней обычно не должно превышать [14]

$$u_{\max}^* = k_\lambda \cdot \lambda_r, \quad (2)$$

где k_λ – коэффициент, характеризующий порядок отклонения (в долях от λ_r), при котором еще не возникает существенного снижения эффективности антенны. В первом приближении можно принять $k_\lambda = 1/10 \dots 1/16$ [14].

Интегральный учет этих отклонений по всей поверхности зеркала осуществляется с помощью величины среднеквадратического отклонения (с.к.о.) геометрии рабочей поверхности от теоретического профиля

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{S} \int_S d^2(r_a) dS} = \sqrt{\frac{1}{N_{ja}} \sum_{i=1}^N (u_i - u_a)^2}, \quad (3)$$

где $r_a = r_a(x, y, z)$ – радиус-векторы точек отражающей поверхности; $d(r)$ – квадрат отклонения отражающей поверхности от поверхности S идеального параболоида; N_{ja} – количество узлов сетки на поверхности зеркала при ее дискретизации; u_i – суммарное (по осям декартовой системы координат) поступательное перемещение i -го узла сетки; u_a – суммарное поступательное перемещение, усредненное по N узлам сетки.

Таким образом, для рассматриваемого типа объектов следует анализировать два параметра прецизионности: u_{\max}^* , имеющий явное физико-техническое обоснование, и δ , являющийся синтетической величиной, значения которой не вытекают непосредственно из принципов работы антенны как радиотехнического устройства, а назначается директивно по опыту эксплуатации аналогичных объектов. Очевидно наличие связи между параметрами u_{\max}^* и δ , но сама форма связи, как правило, неизвестна и не исследуется.

Количественные показатели живучести предлагается определять в относительных величинах следующим образом

$$S^r = \frac{u_{\max_0}}{u_{\max_i}} = h(d); \quad S^r = \frac{\delta_0}{\delta_i} = h(d), \quad (4)$$

где u_{\max_i} , δ_i – соответственно максимальное линейное отклонение и с.к.о. поверхности зеркала при i -ом повреждении каркаса; u_{\max_0} , δ_0 – соответственно максимальное линейное отклонение и с.к.о. поверхности зеркала при неповрежденном каркасе; $h(d)$ – расчетная зависимость от степени поврежденности d (количества разрушенных структурных элементов).

В качестве критериев живучести предлагается рассматривать условия неперевышения текущими значениями u_{\max_i} , δ_i параметров прецизионности поврежденной конструкции их критических величин u_{\max}^* , δ^* :

$$u_{\max_i} < u_{\max}^*; \quad \delta_i < \delta^*. \quad (5)$$

Оба показателя, определяемые в соответствии с (4), равнозначны с позиций оценки реакции конструкции на повреждения. Выбор между ними определяется уровнем информационной обеспеченности анализа живучести. Если в явном виде задано критическое значение с.к.о. δ^* , предпочтительно оценивать живучесть с использованием соотношения δ_0/δ_i . Если величина δ^* неизвестна, можно оценивать живучесть по соотношению u_{\max_0}/u_{\max_i} (критическое значение u_{\max}^* всегда может быть определено по (2)).

Рассмотрим возможности получения оценок живучести для конкретного технического объекта, для которого предъявляются требования прецизионности.

Оценка геометрической стабильности рефлектора выполнена при действии ветрового давления, соответствующего скорости воздушного потока 20 м/с, собственного веса конструкции (гравитации) при закреплении ступицы по трем площадкам, соответствующим условиям крепления конструкции на опорно-поворотном устройстве.

В результате статического анализа напряженно-деформированного состояния неповрежденной конструкции установлено, что наиболее нагруженными являются стержни каркаса в приступичной области. Среди них в большей мере нагружены стержни, примыкающие к нижней опорной части ступицы. В связи с этим сформулированы три сценария последовательного повреждения стержней (рис. 3):

I – разрушение стержней верхнего яруса каркаса, расположенные в приступичной области в непосредственной близости от отражающего зеркала: удалению из расчетной схемы последовательно подвергаются 45 стержней верхнего яруса (выделены на рис. 3 красным цветом), при точке зрения противоположно направлению фокальной оси – удаление осуществляется по часовой стрелке;

II – разрушение стержней нижнего яруса каркаса, расположенные в приступичной области: удалению из расчетной схемы последовательно подвергаются 45 стержней нижнего

яруса (выделены на рис. 3 синим цветом), при точке зрения вдоль направления фокальной оси – удаление осуществляется по часовой стрелке;

III – разрушение стержней нижнего яруса, непосредственно соединенных с приопорной частью ступицы: удалению из расчетной схемы последовательно подвергаются 30 стержней (выделены на рис. 3 зеленым цветом), при точке зрения вдоль направления фокальной оси – удаление осуществляется по часовой стрелке.

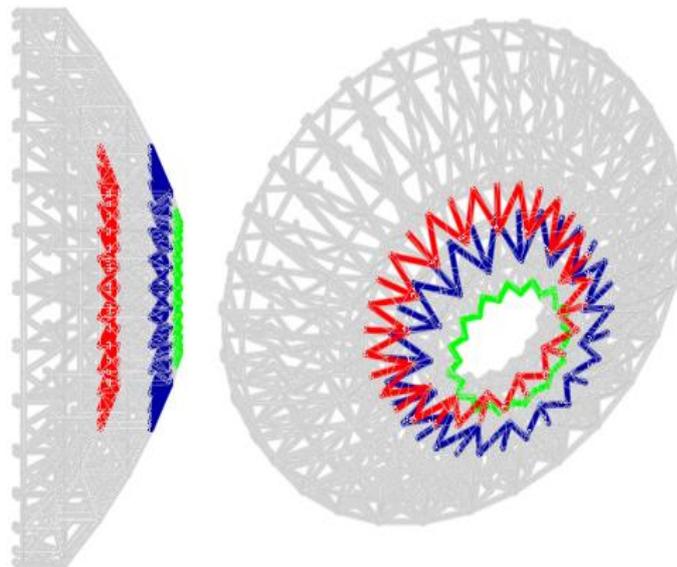


Рис. 3. Стержневые структурные элементы каркаса, разрушаемые в соответствии со сценариями I-III

Зависимости относительных показателей живучести от степени поврежденности (4) принимают значения показанные в табл. 2.

Таблица 2. Цифровая модель живучести стержневого каркаса прецизионного рефлектора параболической антенны наземных систем спутниковой связи

N сценария	Шаг сценария					
	1	2	...	30	...	45
1	{0,9981; 0,9976 }	{0,9969; 0,9961 }	...	{0,8235; 0,8227 }	...	{0,7638; 0,7582 }
2	{0,9896; 0,9926 }	{0,9791; 0,9852 }	...	{0,5870; 0,6327 }	...	{0,4645; 0,5077 }
3	{0,9901; 0,9878 }	{0,9901; 0,9877 }	...	{0,9446; 0,9371 }	–	–

Таким образом, получена цифровая модель живучести, исходя из сценариев повреждения, связанных со структурой каркаса.

Далее, дополнительно введем в рассмотрение критерий (5).

Длины радиоволн определяются по формуле (1) и составляют для диапазонов Q (42,5-45,5 ГГц) и K_a (18,2-21,2 ГГц) соответственно

$$\lambda_r = \left[299792458/42,5 \cdot 10^9; 299792458/45,5 \cdot 10^9 \right] = \left[7,05 \cdot 10^{-3}; 6,59 \cdot 10^{-3} \right] \text{ м};$$

$$\lambda_r = \left[299792458/18,2 \cdot 10^9; 299792458/21,2 \cdot 10^9 \right] = \left[1,65 \cdot 10^{-2}; 1,41 \cdot 10^{-2} \right] \text{ м}.$$

Интервальная оценка максимального линейного отклонения формы рефлектора составит

$$k_\lambda \lambda_r = \left[6,59 \cdot 10^{-3}/16; 1,65 \cdot 10^{-2}/10 \right] = \left[4,12 \cdot 10^{-4}; 1,65 \cdot 10^{-3} \right] \text{ м} = \left[0,412; 1,65 \right] \text{ мм}.$$

Таким образом, максимально допустимое отклонение формы зеркала $u_{\text{max}}^* = 1,65 \text{ мм}$. Предельное с.к.о. в соответствии с техническим заданием составляет $\delta^* = 1,5 \text{ мм}$.

С учетом критериев живучести глубина (количество шагов) сценариев составляет: для I сценария – 8; для II сценария – 3; для III сценария – 11. С учетом этого получим цифровую модель живучести являющуюся подмножеством модели, представленной табл. 2.

Аналогичным образом должны быть построены цифровые модели живучести в эксплуатационном интервале скоростей воздушного потока с некоторым шагом дискретизации (например, 5м/с). В этом случае будет получена система цифровых моделей, позволяющая решать практические задачи интеллектуальной поддержки жизненного цикла.

Заключение. Разработаны цифровые модели живучести, которые могут быть использованы для поддержки принятия следующих решений:

- определение конструктивных элементов, повреждение которых вносит наименьший и наибольший вклад в снижение работоспособности конструкций (для конструктивного управления устойчивостью к повреждениям на стадии проектирования);
- прогнозирование работоспособности при наличии повреждений (предотвращение опасности нарушения функционирования на стадии эксплуатации);
- установление наиболее неблагоприятного сценария нарушения работоспособности (экспертный анализ произошедших аварийных ситуаций на стадии эксплуатации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппова Ю.Ф. Функциональная модель конструкционной живучести пространственных стержневых систем // VI Всероссийская конференция Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем. Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2018. С. 259-263.
2. Доронин С.В., Сигова Е.М., Буйницкая Ю.Ф. Оценка нагруженности и обоснование снижения металлоемкости каркаса телекоммуникационного контейнера в экстремальных условиях эксплуатации // Вестник СибГАУ. 2011. № 7. С. 94-98.
3. Беркутов С.В., Азингареев В.В., Буйницкая Ю.Ф. Исследование прочности и живучести несущих конструкций телекоммуникационного контейнера // Вестник СибГАУ. 2011. № 7. С. 76-80.
4. Буйницкая Ю.Ф. Численное моделирование сценариев разрушения телекоммуникационной мачты // XXIII Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов. М: Изд-во ИМАШ РАН. 2011. С. 18.
5. Doronin S.V., Filippova Y.F. Designs of mining shovels with digging equipment of nonclassical structural layout // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. Iss. 3. Pp. 516-523.
6. Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф. Обоснование расчетных нагрузений карьерных экскаваторов с неклассическими конструктивными схемами рабочего оборудования // Вестник машиностроения. 2017. № 8. С. 17-21.
7. Москвичев Е.В., Филиппова Ю.Ф., Еремин Н.В. Задачи исследования механической прочности и условий разрушения токопроводов с литой изоляцией // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 1. С. 17-23.
8. Филиппова Ю.Ф., Доронин С.В., Москвичев Е.В. Модели температурного деформирования токопроводов с литой изоляцией // Строительная механика и расчет сооружений. 2018. № 3. С. 18-23.

9. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Modeling of the multi-level process of damage accumulation in a reflector skeleton with an inhomogeneous structure [Electronic resource] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2018. Iss. 6. P. 191–202. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.191-202.
10. Filippova Yu.F., Doronin S.V. Numerical and experimental analysis of deformation and destruction of structurally heterogeneous joint assembly // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1260. Iss. 11. Art.112009. DOI:10.1088/1742-6596/1260/11/112009.
11. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Information model of damage accumulation and survivability for a joint assembly of a beam skeleton // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2053. Iss. 1. Art. 040017. DOI: 10.1063/1.5084455.
12. Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф. Оценка живучести структурно-сложных силовых конструкций на основе сценариев накопления повреждений // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2019. № 4 (41). С. 39-54.
13. Талантов И.С. Спектрально-численный метод динамического расчета физически нелинейных стержневых систем с выключающимися элементами: дис. . канд. техн. наук. Санкт-Петербург: СПГАСУ. 2016. 162 с.
14. Металлические конструкции. В 3 т. Т. 3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений (Справочник проектировщика) / Под ред. В.В. Кузнецова. М.: АСВ. 1999. 528 с.

UDK 004.942

DIGITAL MODEL OF SURVIVABILITY TO SUPPORT THE LIFE CYCLE OF BAR STRUCTURES

Sergey V. Doronin

PhD, Assistant Professor, Leading Researcher, e-mail: sdoronin@ict.nsc.ru,

Yulia F. Filippova

PhD, Researcher, e-mail: filippovajf@ict.nsc.ru,

Federal Research Center for Information and Computational Technologies,
660049, Krasnoyarsk, Russia, Krasnoyarsk Branch Office, 53, Mira avenue,

Annotation. The structure and content of digital models of survivability are considered on the example of bar structures. Functional and procedural models of survivability analysis were developed, numerical analysis of the damaged object was carried out with an assessment of survivability indicators. A specific feature of digital survivability models is that scenarios of damage accumulation in bar structures are proposed as the basis for sampling the space of input data and results.

Keywords: digital model, survivability, bar structures, scenarios.

REFERENCES

1. Filippova Ju.F. Funkcional'naja model' konstrukcionnoj zhivuchesti prostranstven-nyh sterzhnevyyh sistem [Functional model of structural survivability of spatial bar systems] // VI Vserossijskaja konferencija Bezopasnost' i monitoring tehnogennyh i prirodnyh sistem = VII All-Russian conference safety and monitoring of technogenic and natural systems. Krasnojarsk: Sib. feder. un-t = Krasnojarsk: Sib. Feder. un-t. 2018. Pp. 259-263. (in Russian).

2. Doronin S.V., Sigova E.M., Bujnickaja Ju.F. Ocenka nagruzhennosti i obosnovanie snizhenija metalloemkosti karkasa telekommunikacionnogo kontejnera v jekstremal'nyh uslovijah jekspluatacii [Assessment of loading and justification of reducing the metal consumption of the frame of a telecommunication container in extreme operating conditions] // Vestnik SibGAU = SibGAU Bulletin. 2011. № 7. Pp. 94-98. (in Russian).
3. Berkutov S.V., Azingareev V.V., Bujnickaja Ju.F. Issledovanie prochnosti i zhivuchesti nesushhih konstrukcij telekommunikacionnogo kontejnera [Investigation of the strength and survivability of the supporting structures of a telecommunication container] // Vestnik SibGAU = SibGAU Bulletin. 2011. № 7. Pp. 76-80. (in Russian).
4. Bujnickaja Ju.F. Chislennoe modelirovanie scenarijev razrushenija telekommunikacionnoj machty [Numerical modeling of scenarios of destruction of a telecommunication mast] // XXIII Mezhdunarodnaja Innovacionno-orientirovannaja konferencija molodyh uchënyh i studentov = XXIII International Innovation-Oriented Conference of Young Scientists and Students. Moskva: Izd-vo IMASh RAN = Moscow: IMASH RAS Publ. 2011. 18 p. (in Russian).
5. Doronin S.V., Filippova Y.F. Designs of mining shovels with digging equipment of nonclassical structural layout // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. Iss. 3. Pp. 516-523.
6. Doronin S.V., Filippova Ju.F. Obosnovanie raschetnyh nagruzhenij kar'ernyh jekska-vatorov s neklassicheskimi konstruktivnymi shemami rabochego oborudovanija [Substantiation of design loads of open-pit excavators with non-classical design diagrams of working equipment] // Vestnik mashinostroenija = Russian Engineering Research. 2017. № 8. Pp. 17-21. (in Russian).
7. Moskvichev E.V., Filippova Ju.F., Eremin N.V. Zadachi issledovanija mehanicheskoj prochnosti i uslovij razrushenija tokoprovodov s litoj izoljaciej [Research tasks of mechanical strength and conditions of destruction of cast resin conductors] // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii = Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and technology. 2017. T. 10. № 1. Pp. 17-23. (in Russian).
8. Filippova Ju.F., Doronin S.V., Moskvichev E.V. Modeli temperaturnogo deformirovanija tokoprovodov s litoj izoljaciej [Models of thermal deformation of cast resin conductors] // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij = Construction mechanics and construction calculations. 2018. № 3. Pp. 18-23. (in Russian).
9. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Modeling of the multi-level process of damage accumulation in a reflector skeleton with an inhomogeneous structure [Electronic resource] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2018. Iss. 6. Pp. 191–202. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.191-202.
10. Filippova Yu.F., Doronin S.V. Numerical and experimental analysis of deformation and destruction of structurally heterogeneous joint assembly // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260. Iss. 11. Art.112009. DOI:10.1088/1742-6596/1260/11/112009.
11. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Information model of damage accumulation and survivability for a joint assembly of a beam skeleton // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2053. Iss. 1. Art. 040017. DOI: 10.1063/1.5084455.
12. Doronin S.V., Filippova Ju.F. Ocenka zhivuchesti strukturno-slozhnyh silovyh konstrukcij na osnove scenarijev nakoplenija povrezhdenij [Assessment of the survivability of structurally complex load-bearing structures based on scenarios of damage accumulation] // Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta = Bulletin of the

- Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2019. № 4 (41). Pp. 39-54. (in Russian).
13. Talantov I.S. Spektral'no-chislennyj metod dinamicheskogo rascheta fizicheski neli-nejnyh sterzhnevyyh sistem s vykljuchajushhimisja jelementami. Dis. kand. tehn. Nauk [Spectral-numerical method for dynamic calculation of physically nonlinear rod systems with switching off elements: dis. Cand. tech. sciences]. Sankt-Peterburg: SPGASU = St. Petersburg: SPGASU. 2016. 162 p. (in Russian).
 14. Metallicheskie konstrukcii. V 3 t. T. 3. Stal'nye sooruzhenija, konstrukcii iz aljumi-nievyyh splavov. Rekonstrukcija, obsledovanie, usilenie i ispytanie konstrukcij zdaniy i sooruzhenij (Spravochnik proektirovshhika) [Metal constructions. In 3 volumes. V. 3. Steel structures, structures from aluminum alloys. Reconstruction, inspection, strengthening and testing of structures of buildings and structures (Designer's Guide)] / Pod red. V.V. Kuznecova. Moskva: Izd-vo ASV = Moscow: ASV Publ. 1999. 528 p. (in Russian).