

8. Целостность и безопасность трубопроводных систем / С.А. Тимашев, А.В. Бушинская, М.Г. Малюкова, Л.В. Полуян. Екатеринбург : АМБ, 2013. 589 с.
9. Timashev S.A., Bushinskaya A.V. Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems. Springer Int. Publ. Switzerland, 2016. 408 p.
10. Гишваров А.С., Тимашев С.А. Теоретические основы ускоренной оценки и прогнозирования надёжности технических систем. Екатеринбург : УрО РАН, 2012. 180 с.

УДК 624.074.5:004.041

## **ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КОНСТРУКЦИОННОЙ ЖИВУЧЕСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ**

Филиппова Ю.Ф.

Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал, г. Красноярск

Понятие живучести в настоящее время весьма широко используется при характеристике свойств искусственных (технических систем) и естественных (неживая природа, биологические системы) объектов. Это понятие характеризуется универсальностью и междисциплинарностью, одним из следствий которых оказываются затруднения в четкой и однозначной формулировке понятия, многообразие подходов к его количественному определению. Так, различные подходы к построению концепции анализа живучести предполагают

- определение отношения вероятностей отказа системы в поврежденном и неповрежденном состояниях [1];
- изучение характеристик чувствительности к определенным (неблагоприятным) событиям [2];
- анализ избыточности (резервирования) системы с учетом путей передачи силового потока [3];
- удаление отдельных элементов для определения несущей способности оставшейся части конструкции [4].

В развитие и конкретизацию понятия живучести и подходов к его определению применительно к различным классам технических систем и объектов существенный вклад внесен Н.А. Махутовым [5], А.В. Перельмутером [6], Ю.И. Кудишиным [7, 8], Н.В. Клюевой [9] и другими исследователями.

Достаточно полным, охватывающим наиболее важные аспекты, является содержащееся в ГОСТ 27.002-2015 определение живучести как свойства объекта, состоящего в его способности

- противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений;
- сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации;
- сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов и повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов.

Исходя из этого, необходимо получение количественных характеристик поведения (свойств) конструкций при наличии дефектов и повреждений в условиях как штатного, так и запроектного нагружения. Эти характеристики следует рассматривать в динамике, с учетом фактора времени.

Таблица 1. Характеристика системообразующих факторов стержневых конструкций в рамках методологии строительной механики

Факторы	Характеристика
Свойства элементов	1. Балки, воспринимающие осевые усилия, изгибающие и крутящие моменты 2. Стержни, воспринимающие только осевые усилия 3. Гибкие нити, воспринимающие только растягивающие осевые усилия 4. Арки, работающие в условиях распора
Свойства опор	1. Ограничивающие одну степень свободы (шарнирно-подвижная опора) 2. Ограничивающие две степени свободы (шарнирно-неподвижная опора) 3. Ограничивающая три степени свободы (жесткая заделка) 4. Частично ограничивающие степени свободы по заданному закону (упругое основание) 5. Односторонние связи, ограничивающие степени свободы по одному направлению
Свойства соединений элементов	1. Шарнирные соединения, передающие только осевые усилия и формирующие ферменную стержневую систему 2. Жесткие соединения, передающие осевые усилия, изгибающие моменты и формирующие рамную стержневую систему
Конструктивная схема	1. Плоские системы, воспринимающие нагрузки только в своей плоскости 2. Пространственные системы, воспринимающие нагрузки произвольного направления 3. Статически определимые системы, для расчета которых достаточно рассмотрение условий равновесия 4. Статически неопределимые системы, содержащие лишние связи, требующие при расчете рассмотрения не только уравнений равновесия, но и уравнений, вытекающих из деформированного состояния системы

Очевидна необходимость конкретизации приведенных выше общих рассуждений. Один из способов конкретизации заключается в учете конструктивных особенностей и свойств объекта, т.е. ограничение по некоторому классу или типу объектов. Выполним такую конкретизацию для широко распространенного класса технических объектов – силовым конструкциям стержневого типа. Принадлежность объекта к этому классу определяется наличием системообразующих факторов (табл. 1), формирующих комплекс свойств объекта, в том числе свойства живучести.

Свойства конструкции являются результатом системного взаимодействия свойств стержневых элементов, их соединений, пространственного расположения стержней относительно друг друга (конструктивной схемы), а также условий взаимодействия с системным окружением (свойствами опор) (рис. 1)

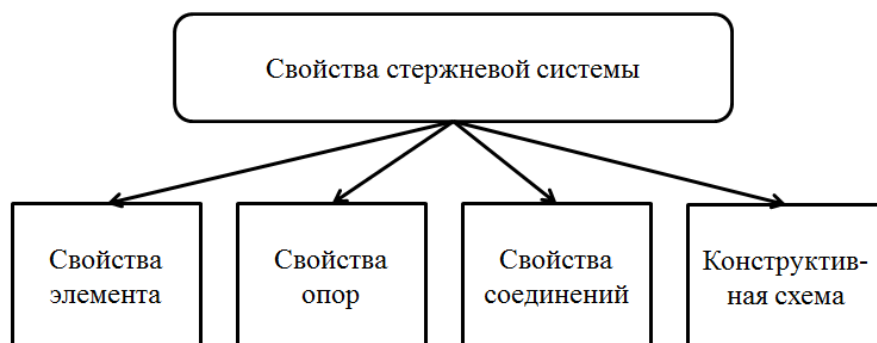


Рис. 1. Факторы формирования системных свойств стержневой системы

Исходя из этого семантика понятия «живучесть» применительно к стержневым конструкциям (конструкционная живучесть стержневых систем) определяется структурно-логической схемой на рис. 2.



Рис. 2. Структурно-логическая схема конструкционной живучести стержневых систем

Под повреждением в соответствии с ISO 13822:2010 понимаем изменение состояния объекта, которое может неблагоприятно повлиять на его функционирование. Далее необходима конкретизация этой схемы посредством ее информационно-вычислительного обеспечения, что позволит снизить нечеткость и неоднозначность рассуждений, довести их до уровня процедур (процедурных моделей), алгоритмов и программ.

Процедурная модель является одним из классов вычислительных моделей и представляет собой набор конкретных процедур анализа исследуемого процесса (объекта, явления) в совокупности с указанием необходимой информации и предполагаемых результатов. Разработке процедурной модели предшествует функциональная модель, включающая в себя определение содержания (функций) основанных процедур, а также входной и выходной информации при реализации (табл. 2). Реализация предлагаемой модели характеризует все аспекты конструкционной живучести стержневых систем.

Рассматриваемая функциональная модель анализа живучести стержневых систем частично реализована для силовых стержневых конструкций оборудования цифрового телерадиовещания и спутниковой связи в экстремальных условиях эксплуатации [10, 11]. Для мачты высотой 12 м описан сценарий прогрессирующего обрушения при единичном отказе ключевых (наиболее напряженных) элементов. Для телекоммуникационного контейнера также определены возможные сценарии и определены распределения напряжений после внезапного удаления стержневых элементов.

Таблица 2. Элементы функциональной модели конструкционной живучести

Вход	Процедура	Выход
<b>Анализ живучести при повреждении элементов</b>		
Пространство возможных состояний поврежденности	Определение перечня состояний поврежденности	Модели поврежденных состояний
Пространство возможных нагрузок и воздействий	Определение внешних нагрузок и воздействий	Модели внешних нагрузок и воздействий
Критерии прочности и разрушения	Анализ напряженно-деформированного состояния, параметров механики разрушения	Характеристики прочности и разрушения поврежденных элементов
<b>Анализ живучести при повреждении соединений</b>		
Структура и свойства соединения	Логический анализ взаимодействия элементов и соединений	Возможные сценарии накопления повреждений в соединении
Модели внешних нагрузок и воздействий	Исследование механики деформирования соединения	Внутренние силовые факторы в элементах соединения
Возможные сценарии накопления повреждений в соединении	Многовариантный анализ деформирования и разрушения соединения	Реализуемые сценарии накопления повреждений и разрушения соединения
<b>Анализ живучести при повреждении структуры</b>		
Конструктивная схема стержневой системы. Модели внешних нагрузок и воздействий	Многовариантный анализ деформирования и разрушения конструкции	Сценарии повреждения и разрушения структуры при внешних нагрузках и воздействиях
Конструктивная схема стержневой системы	Анализ структурной избыточности стержневой системы	Траектории развития повреждений структуры, лимитирующие ее живучесть
<b>Анализ живучести неповрежденной конструкции</b>		
Структура и свойства надсистемы, условия взаимодействия конструкции с системным окружением	Определение экстремальных, аварийных, запроектных нагрузок и воздействий	Модели экстремальных, аварийных, запроектных нагрузок и воздействий
Конструктивная схема стержневой системы. Модели экстремальных, аварийных, запроектных нагрузок и воздействий	Многовариантный анализ напряженно-деформированного состояния и сценариев разрушения	Конструктивный отклик на экстремальные, аварийные, запроектные нагрузки и воздействия

### Литература

1. Lind N.A. A measure of vulnerability and damage tolerance // Reliability Engineering & System Safety. 1995. № 48(1):1-6.
2. Augusti G., Borri C., Niemann H.J. Is Aeolian risk as Significant as other environmental

- risks? // Reliability Engineering & System Safety. 2001. № 74(3):227-237.
3. Hendawi S., Frangopol D.M. System reliability and redundancy in structural design and evaluation // Structural safety. 1994. № 16(1-2):47-71
  4. Ellingwood B., Legendecker E. Approaches for design against progressive collapse // Journal of Structural Division. 1978. № 104(3):413-423.
  5. Махутов Н.А., Петров В.П., Резников Д.О. Оценка живучести сложных технических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 3. С. 47-66.
  6. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М. : Издательство СКАД СОФТ, 2011. 736 с.
  7. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Живучесть конструкций в аварийных ситуациях // Металлические здания. 2008. № 4-5.
  8. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Методика расчета строительных конструкций на единичную живучесть. М., 2009.
  9. Ключева Н.В., Бухтиярова А.С., Прокопенко В.В. К определению параметра живучести пространственных конструктивных систем смешанным методом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. № 3(36). С. 146-149.
  10. Буйницкая Ю.Ф. Численное моделирование сценариев разрушения телекоммуникационной мачты // Институт машиноведения РАН им. А.А. Благодирова. XXIII Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2011). М : Изд-во ИМАШ РАН, 2011. С. 18.
  11. Буйницкая Ю.Ф. Особенности НДС поврежденных стержневых систем // Труды IV Всероссийской конференции. В 2 т.; Научн. ред. В.В. Москвичев. Красноярск : Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 2012. Т. 2 : Секция 2 «Мониторинг, экспертиза и оценка технического состояния потенциально опасных и критически важных объектов», Секция 3 «Методы и технологии анализа риска и моделирование ЧС природного и техногенного характера». С. 35-39.

УДК 629.7.38

## **КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАРТИЙ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ ДЛЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Шангина Е.А., Патраев В.Е.

АО «Информационные спутниковые системы»  
имени академика М.Ф. Решетнева», г. Железногорск

Рассмотрены вопросы обеспечения качества партий ЭРИ для бортовой аппаратуры космических аппаратов информационного обеспечения. Определены уровни качества партий ЭРИ, комплектующих бортовую аппаратуру. Приведены виды дополнительных испытаний партий ЭРИ в целях гарантированного обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности бортовой аппаратуры в условиях воздействия факторов космического пространства.

Ключевые слова: Бортовая аппаратура, электрорадиоизделия, космический аппарат.