

ОЦЕНКА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЕТРОВЫХ ПОТОКОВ КАК ВАЖНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. И. Комаров

Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

В статье кратко рассмотрены существующие методы оценки живучести. Обоснована необходимость повышения живучести сложных технических систем. Представлены возможные пути развития понятия «живучесть». Раскрыта актуальность дальнейшего исследования и совершенствования методик оценки живучести, надежности, безопасности и эффективности разнородных сложных технических систем; необходимости проведения на предварительном этапе детальной оценки всей совокупности исходных условий воздействующих факторов. Описаны преимущества рассмотренных методик оценки живучести.

Ключевые слова: живучесть, индексы живучести, оценка, система, безопасность, нагрузки, воздействия, расчеты.

ASSESSMENT OF AERODYNAMIC IMPACT OF WIND FLOWS AS AN IMPORTANT ELEMENT OF LIFE SUPPORT OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

A. I. Komarov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)

The article briefly reviews the existing methods of survivability assessment. The necessity of increasing the survivability of complex technical systems is substantiated. Possible ways of development of the concept of "survivability" are presented. The urgency of further research and improvement of methods for assessing the survivability, reliability, safety and efficiency of heterogeneous complex technical systems; the necessity of carrying out a detailed assessment of the totality of initial conditions of influencing factors at a preliminary stage is disclosed. The advantages of the considered methods of survivability assessment are described.

Keywords: survivability, survivability indices, appraisal, system, safety, loads, impacts, calculations.

Введение

В настоящее время в области оценки риска сложных технических систем (СТС) все большее внимание уделяется определению *живучести* объекта. Под живучестью понимается способность системы выполнять предписанные ей функции после повреждения ее отдельных элементов. Данная характеристика показывает насколько хорошо объект будет функционировать при нагрузках, превышающие проектные.

СТС с большей живучестью разрушаются медленнее и сохраняют при этом ограниченную работоспособность. Это позволяет оператору системы принять защитные меры. Системы с малой живучестью разрушаются резко, что сопровождается значительными вторичными и каскадными разрушениями. Важным различием между системами с низкой и высокой живучестью является особенность распределения ущерба. Система с высокой живучестью подвержена только локальным повреждениям и имеет

только прямой ущерб. Система с низкой живучестью имеет «тяжелый хвост» вторичных и косвенных ущербов от невыполнения системой предписанных ей функций [2]. Таким образом, повышение живучести СТС ведет за собой:

- снижение риска возникновения аварий и ЧС;
- уменьшение ущерба от аварий и ЧС.

Несмотря на очевидную необходимость повышения живучести систем, на сегодняшний день не существует единого алгоритма определения данного параметра. Ниже рассмотрены существующие методы оценки живучести, которые в будущем могут послужить основой для разработки общей методики.

Оценка живучести при помощи моделирования сложных систем

В статье [10] предложен «общий логико-вероятностный метод» (ОЛВМ), который позволяет оценить не только живучесть, но также надежность, безопасность и эффективность разнородных СТС. Технология исследования свойств систем с применением ОЛВМ включает следующие действия:

- графоаналитическое модельное представление структурно-сложной системы исследователем с использованием интерфейса ПК АСМ;
- выполняемая ПК АСМ, автоматическая корректная свертка функциональной структуры модели системы в значения требуемых показателей свойств - целевых (выходных) функций системы;
- анализ результатов исследователем, проведение серии расчетов с варьированием показателей свойств и целевых функций.

Графоаналитическое модельное представление структурно-сложной системы осуществляется с помощью логически универсального средства – схемы функциональной целостности, с задаваемыми в исходных данных значениями показателей функционирования элементов по их целевому назначению.

Несомненным плюсом ОЛВМ является простота расчета. Правила вычисления графов известны и не вызывают сложностей. При должном оборудовании возможно вычислять огромные сети графов, решая, таким образом, многоуровневые задачи.

Оценка живучести через различные показатели

В статье [8] авторы приводят 6 различных методов, применимых для оценки живучести, через: отношения вероятности отказов СТС, отношения нагрузки необходимой для разрушения СТС, надежность элементов СТС, соотношения рисков прямых и косвенных ущербов, энергетические потоки внутри отдельных элементов системы и перераспределение нагрузки на другие элементы системы.

Все выше перечисленные методы автор применяет к оценке живучести СТС, при этом в случае развития, существует возможность применения последних трех методов к оценке живучести территорий, принимая за исходные данные зоны поражения и поля рисков ПОО, расположенных на территории.

Наиболее актуальные на сегодняшний момент являются метод соотношения рисков прямых и косвенных ущербов (далее – метод «индекс живучести, основанный на соотношении рисков прямых и косвенных ущербов») и метод, учитывающий перераспределение нагрузок на другие элементы системы (далее – метод «живучесть сетевых систем»). Ввиду наибольшей актуальности рассмотрим выше обозначенные методы.

В методе соотношения рисков прямых и косвенных ущербов автор под прямыми рисками принимает риски, которые непосредственно связаны с локальными повреждениями элементов системы в результате экстремальных иницирующих воздействий; под косвенными – риски, которые возникают в результате эскалации аварии и обусловлены отказом системы в целом. Данное высказывание можно представить в виде (1).

$$G_R = \frac{\sum_{i=1}^m R_{пр_i}}{\sum_{i=1}^m R_{пр_i} + \sum_{i=1}^n R_{кос_i}}, \quad (1)$$

где m – общее количество сценариев, в которых произошло иницирующие событие; n – количество сценариев, в которых наблюдается развитие аварии с увеличением ущербов; $R_{пр_i}$ – прямые риски; $R_{кос_i}$ – косвенные риски; G_R – живучесть.

В случае если $G_R \rightarrow 1$ – система абсолютно живучая, $G_R \rightarrow 0$ – система абсолютно неживучая, т.е. система живуча если косвенные риски не вносят вклад в общий риск ($R_{пр_i} \gg R_{кос_i}$).

Данный метод не привязан к характеристикам оборудования, что означает возможность более широкого применения, выходя за рамки оценки живучести СТС.

В методе «живучесть сетевых систем» автор указывает на необходимость учета способности системы перераспределять потоки энергий, вещества и информации (E, W, I) и продолжать выполнение задач после того, как отдельные элементы системы выходят из строя, ввиду того, что в результате отказа одного элемента сети вероятность отказа остальных элементов возрастает. Данное высказывание можно представить в виде (2).

$$G_{net} = \min_i P R > L | D_i, \quad (2)$$

где $P(R > L|D_i)$ – вероятность того, что несущая способность элемента будет выше эксплуатационной нагрузки, после удаления из системы одного из элементов и перераспределения проходивших через него потоков на оставшиеся элементы; R - несущая способность системы; L - эксплуатационная нагрузка на систему; D_i – локальное повреждение системы, выражающееся в удалении i -го элемента; G_{net} - живучесть.

Данный метод является наиболее комплексным, рассматривая все элементы системы, перестраивая ее каждый раз при изменении какого-либо параметра, тем самым получая наиболее точный, полный, учитывающий все возможные факторы результат. Подходит для разработки расчетных методик для типовых СТС, либо уникальных объектов требующих высокой точности результатов. Однако, использование данной методики для типовых СТС является затруднительным ввиду большого объема и сложности расчетов.

Оценка живучести на основе логико-вероятностного метода

Ниже приведена методика, основанная на логико-вероятностном методе [11]. Для простоты понимания рассмотрим ее в виде блок-схемы (рис.1). При описании элементов полагается, что каждый элемент может находиться в одном из трех состояний: e_0 - элемент работоспособен и включен в работу; e_1 - элемент работоспособен и отключен от системы по различным причинам; e_2 - элемент неработоспособен. Переходы из состояния в состояние определяются: естественными отказами элементов, восстановлением работоспособности, переключениями при срабатывании средств аварийной защиты и реконфигурации, действиями внешних возмущений. Связи между элементами определены и стационарны во времени. Признаки работоспособности системы неизменны во времени и позволяют однозначно определить состояние системы по совокупности состояний ее элементов [11].

На **первом этапе** проводится определение элементов, индикаторов их состояний и индикаторов возмущений. На **втором этапе** составляются логические зависимости. На этом этапе управления составляются логические уравнения относительно неизвестных состояний работоспособных элементов на основе предварительного анализа. Совокупность подобных выражений образует замкнутую систему логических уравнений, представляемую в векторной форме в вид:

$$Y = f_Y(X, Y, Z) \quad (4)$$

Логическая функция работоспособности (ЛФРС) может быть записана как для однофункциональной, так и для многофункциональной системы. Далее (**этап 3**), решается система логических уравнений. Один раз для базовой структуры S_0 , когда все $z_{ij} = 0$, и еще столько раз, сколько различных видов возмущений. Перебирая все варианты при однократном и многократных воздействиях, удается получить полный набор

работоспособных структур в системе. На **этапе 4** происходит вероятностное описание элементов и внешних возмущений. Каждый элемент представлен в вероятностной модели вероятностью $p_i = P(x_i = 1)$ того, что в данный или в произвольный момент времени элемент работоспособен. В ходе **пятого этапа** преобразуется ЛФРС к форме перехода к замещению.

На **шестом этапе** записывают смешанную форму. В результате замещения неповторных переменных в преобразованной ЛФРС некоторые логические переменные и операции замещаются на вероятности и арифметические операции, а остальные переменные и операции переходят в показатели степени арифметических выражений. Полученная таким образом форма называется смешанной формой, так как содержит одновременно логические переменные и вероятности и две группы операций: логические и арифметические. На **седьмом этапе** производится определение показателей живучести. С помощью многошаговой процедуры замещения логических переменных в смешанных формах, составленных для базовой структуры S_0 и других работоспособных структур S_i . Для систем с i -й после этапа 6 требуется выполнить еще три этапа (этапы 8, 9) и только затем вернуться к этапу 7 [11].

Если система имеет ветвящуюся структуру, то составляют полином распределения вероятностей состояния одной i -ой ветви (**этап 8**).

$$\Phi_i(z, X) = 1 + (z - 1)Q(X) \quad (8)$$

где $Q(X) = P\{F(X) = 0\}$ - смешанная форма, X - вектор незамещенных логических переменных.

Девятым этапом идет составление производящего полинома для системы. При изотропной структуре полином возводится в степень, равную коэффициенту разветвления на нижнем ярусе ветвящейся структуры, затем проводится замещение логически переменных, относящихся к следующему ярусу, далее снова возведение в степень, замещение и т.д. В результате многошаговой процедуры получается полином, коэффициенты которого выражают вероятности того, что неработоспособно определенное количество ветвей. Если структура неизотопная, то возведение в степень заменяется перемножением полиномов.

Логико-вероятностный метод

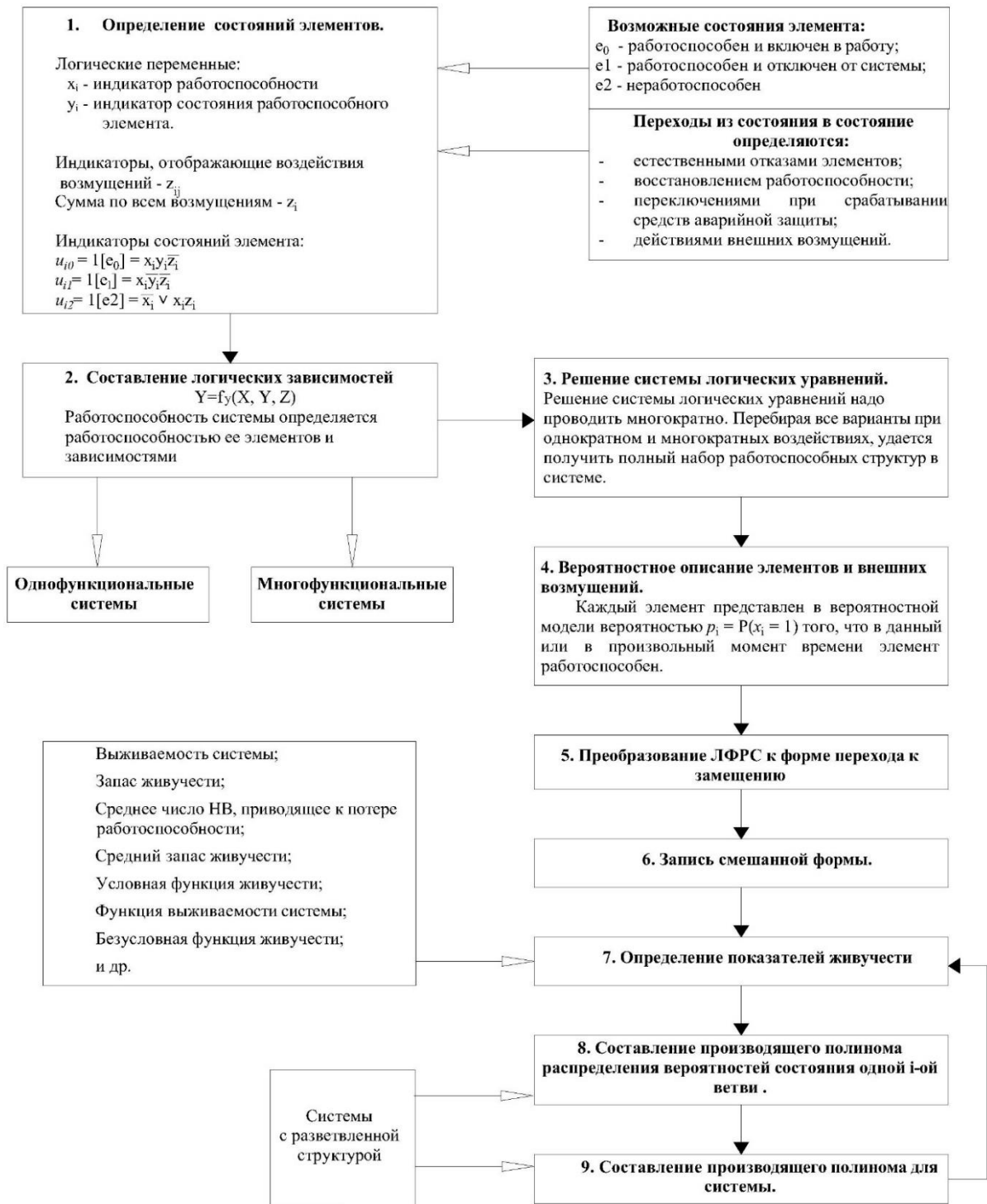


Рисунок 1 – Блок-схема методики расчета живучести на основе логико-вероятностного метода.

Оценка живучести по состоянию системы

Суть метода представлена на воздействии на систему точечными НВ с одинаковой вероятностью поражения всех элементов системы, в случае поражения конкретного элемента, данный элемент переходит в неработоспособное состояние. Живучесть определяется количеством непораженных элементов при случайном поражении всех элементов системы и представлена в виде:

$$R(n) = \sum_{X \in X_1} P(X|A_n), \quad (9)$$

где X_1 – подмножество векторов X , соответствующих работоспособным состояниям системы;

A_n – событие, означающее появление НВ.

Вероятность $P(X|A_n)$ находится по формуле:

$$P(X|A_n) = \sum_{\vec{n} \in M_n} P(\vec{n})P(X|\vec{n}), \quad (10)$$

где $P(\vec{n})$ – вероятность неблагоприятных воздействий;

$P(X|\vec{n})$ – вероятность работоспособных состояний системы при неблагоприятных воздействиях.

Заключение

В настоящее время интерес к определению понятия живучести и вычислению этого параметра непрерывно растет. Данная тенденция связана с тем, что повышение живучести ведет к значительному снижению риска возникновения аварий и ЧС, а также к уменьшению ущерба от них.

К сожалению, на сегодняшний день не существует единой методики вычисления живучести СТС. Но публикуется все больше статей, предлагающих различные методы оценки данного показателя.

В [10] предложен «общий логико-вероятностный метод», основой которого является сеть графов. Правила вычисления графов известны и не вызывают сложностей. При должном оборудовании возможно вычислять огромные сети графов, решая, таким образом, многоуровневые задачи.

Авторами [8] предложены несколько методов определения живучести, позволяющие взглянуть на проблему с разных сторон. Представлена прогрессивная идея необходимости учета способности системы перераспределять потоки энергий, вещества и информации (E, W, I) и продолжать выполнение задач после того, как отдельные элементы системы выходят из строя. В методе «живучесть сетевых систем» автор указывает на необходимость учета способности системы перераспределять потоки энергий, вещества и информации (E, W, I)

и продолжать выполнение задач после того, как отдельные элементы системы выходят из строя, ввиду того, что в результате отказа одного элемента сети вероятность отказа остальных элементов возрастает. Преимуществом данного метода является способность перестраивать систему каждый раз при изменении какого-либо параметра, тем самым получая наиболее точный, полный, учитывающий все возможные факторы результат.

В [11] показаны методики расчета на основе логико-вероятностного метода и теории случайных размещений. Обе методики требуют большого количества исходных данных, что позволяет им быть чувствительными к любому изменению, а, следовательно, выдавать наиболее достоверный результат.

Понятие живучести следует понимать намного шире, нежели только в рамках СТС. Изначально «живучесть» была сформулирована в 70-х годах XIX века и была применена к судостроению [11]. Российскими и зарубежными учеными проводятся экспериментально-теоретические исследования для распространения критерия живучести в различных сферах, таких как строительство [2, 3, 4, 6, 7, 9, 12, 14], военная техника [13], информационные системы, космическое кораблестроение [1, 5] и др. Для достижения цели по повышению живучести в конкретных сферах жизнедеятельности необходимо изначально учитывать всю совокупность факторов (производных элементов). Например, в сфере строительства для оценки живучести необходимо проводить предварительную оценку конструктивной безопасности систем зданий, сооружений, в том числе используемых материалов, технологий на всех этапах строительства; детальную оценку всей совокупности природных условий: аэродинамического воздействия ветровых потоков на высотные объекты, снега, льда, сейсмических воздействий, водяного балласта, нагрузок вследствие сдвигов и сотрясений грунта; других особых воздействиях (минно-взрывные воздействия и др.); людских и транспортных нагрузок. Среди неохваченных сфер, стоит выделить применение оценки живучести к территориям. Данное направление имеет потенциал внести весомый вклад в безопасность и развитие экономики регионов.

Библиографический список

1. Абдурахимов, А. А. Методологические основы обеспечения живучести космических аппаратов / А. А. Абдурахимов, Д. В. Скворцов // Труды Военно-Космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Выпуск 640 (сентябрь). – С. 7-19. — URL: https://vka.mil.ru/upload/site5/document_file/640_2013.pdf (дата обращения 20.08.2023).
2. Драган, В. И. Методика расчета живучести структурных конструкций системы "БрГТУ" / В. И. Драган, Н. Л. Морилова // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 39–46. – URL: <https://rep.bstu.by/handle/data/2988> (дата обращения 28.10.2023).

3. Дубинский, С. И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дубинский Сергей Иванович ; Московский государственный строительный университет. – Москва, 2010. – 20 с. Библиогр.: с. 20.
4. Ефремян, Д. А. Живучесть строительных конструкций / Д. А. Ефремян, А. Ю. Сидоренко // Молодой ученый. — 2017. — № 19 (153). — С. 49-51. — URL: <https://moluch.ru/archive/153/43392/> (дата обращения: 24.10.2023).
5. Кривошея, Д. О. Метод обеспечения функциональной живучести иерархических информационных систем на беспроводных ячеистых сетях : специальность 05.13.17 «Теоретические основы информатики» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кривошея Денис Олегович ; Белгородский государственный национальный исследовательский университет. – Белгород, 2014. – 24 с. – URL: <https://www.dissercat.com/content/metod-obespecheniya-funktsionalnoi-zhivuchesti-ierarkhicheskikh-informatsionnykh-sistem-na-b> (дата обращения 20.08.2023).
6. Лахта центр : автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания / М. А. Десяткин, Ю. А. Колотовичев, В. И. Травуш [и др.] // Academia. Архитектура и строительство. – 2018. – № 4. – С. 94–108. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36944638> (дата обращения: 27.10.2023).
7. Леденев, П. В. Определение ветровых воздействий на навесные фасадные системы с учетом влияния вентилируемой воздушной прослойки : специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения», 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Леденев Павел Викторович ; Научно - исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук ; Научно - исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. – Москва, 2011. – 23 с. Библиогр.: с. 21 – 23.
8. Махутов, Н. А. Оценка живучести сложных технических систем / Н. А. Махутов, В. П. Петров, Д. О. Резников // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2009. — № 3. — С. 47-66. — URL: http://imash.ru/netcat_files/File/Ahmethanov/%D0%9E%D0%A6%D0%95%D0%9D%D0%9A%D0%90%20%D0%96%D0%98%D0%92%D0%A3%D0%A7%D0%95%D0%A1%D0%A2%D0%98%20%D0%A1%D0%9B%D0%9E%D0%96%D0%9D%D0%AB%D0%A5%20%D0%A2%D0%95%D0%A5%D0%9D%D0%98%D0%A7%D0%95%D0%A1%D0%9A%D0%98%D0

- [%A5%20%D0%A1%D0%98%D0%A1%D0%A2%D0%95%D0%9C.pdf](#) (дата обращения 25.10.2023).
9. Материалы международной научно-технической конференции в национальном исследовательском Московском государственном строительном университете // Строительная наука и образование в интегрированном пространстве с новыми регионами Российской Федерации / 13.04.2023 : [сайт]. — URL: <https://mgsu.ru/news/announce/52915/> (дата обращения 13.04.2023).
 10. Можаяев, А. С. Технология автоматизированного моделирования структурно-сложных систем / А. С. Можаяев, В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свиригин // Морская радиоэлектроника. — 2008. — № 2 (24). — С. 52-55. — URL: <https://szma.com/wp-content/uploads/2016/10/art58.pdf> (дата обращения: 15.09.2023).
 11. Недосекин, А. О. Оценка живучести сложных структур при многофакторных воздействиях высокой точности / А. О. Недосекин, Г. Н. Черкесов // — URL: http://www.ifel.ru/surv/Res_4.pdf (дата обращения 24.10.2023).
 12. Ноговицин, А. Е. Сейсмозащита каркасных железобетонных зданий / А. Е. Ноговицин // Молодой ученый. — 2019. — № 48 (286). — С. 78-81. — URL: <https://moluch.ru/archive/286/64526/> (дата обращения: 27.10.2023).
 13. Сафонов, Р. А. Методика оценки живучести сложных систем военного назначения / 2003. — С. 1-3. — URL: <https://xreferat.com/17/622-1-metodika-ocenki-zhivuchesti-slozhnyh-sistem-voennogo-naznacheniya.html> (дата обращения 28.10.2023).
 14. Численное моделирование воздействий ветра на высотные здания / В. Н. Алёхин, А. А. Антипин, С. Н. Городилов [и др.] // Секция 3. Обеспечение комплексной безопасности зданий и сооружений в современном строительстве ; Екатеринбург, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина — sapros_ustu@mail.ru, 2014. — С. 247-253. — URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/91339/1/eltsin_2014_044.pdf/ (дата обращения: 22.09.2023).