

Методы исследования устойчивости систем жизнеобеспечения к экстремальным воздействиям

Г. Г. Гребенюк, Л. А. Середа

Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова, Российская академия наук, Москва, Россия

Поступила в редколлегию 01.10.2025 г. Принята 10.10.2025 г.

Аннотация—Проведен систематический анализ публикаций по устойчивости инженерной инфраструктуры, включая системы жизнеобеспечения. Рассмотрены особенности моделирования угроз, модели и методы поиска уязвимостей таких систем в условиях экстремальных воздействий. Представлены общая характеристика процесса восстановления, модели и методы исследования этого процесса. Рассмотрены показатели оценки устойчивости систем жизнеобеспечения, соответствующие математические модели и методы. Отмечается, что в настоящий момент не существует согласованных показателей устойчивости, по которым возможно проводить обоснованное сравнение систем. Многие публикации сконцентрированы на фазах устойчивости (подготовка, поглощение, восстановление и адаптация) применительно к конкретным системам (электроэнергетика, водоснабжение, связь и др.). По результатам проведенного анализа литературы предложена последовательность процедур по исследованию устойчивости систем жизнеобеспечения, которая может быть использована при имитационном моделировании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система жизнеобеспечения, угрозы, уязвимости, восстановление, устойчивость.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_3_369

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является анализ математических моделей и методов, применяемых для описания влияния внешних угроз на функциональность системы жизнеобеспечения и принятия решений по восстановлению системы после экстремального воздействия, рассмотрение устойчивости как совокупности процессов от появления угрозы до восстановления функциональности системы, определение тенденций текущих и будущих исследований по повышению устойчивости систем жизнеобеспечения. Эта цель достигается проведением систематического обзора мировой литературы, посвященной исследованиям инфраструктурных сетей, подверженных внешним воздействиям.

Инженерная инфраструктура жизнеобеспечения выполняет фундаментальную роль в государстве и является критической, обеспечивая общество необходимыми услугами для проживания и трудовой деятельности.

Под инженерными объектами этой инфраструктуры будем понимать объекты основных фондов, относящиеся к классам «машины и оборудование» и «здания и сооружения», уровень детализации которых зависит от решаемой задачи и определяется используемыми для этого свойствами функциональности и агрегативности [1]. Объекты инфраструктуры жизнеобеспечения объединены функционально в сложные сетевые инженерные системы производства продукции и предоставления услуг потребителям.

Эти объекты, подвергаясь экстремальным воздействиям (ЭВ), различным образом реагируют на них, что требует для исследования устойчивости применения различных методов. По

этой причине научные публикации по исследованию устойчивости разделены на два относительно условных направления. В первом рассматривается устойчивость зданий и сооружений, как локальных инженерных объектов, например, зданий теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), сооружений для трубопроводов, мачт для крепления воздушных линий электропередач и т.д. Влияние ЭВ на такие объекты проявляется через изменение их прочностных характеристик. Во втором направлении рассматривается устойчивость сетевых систем, как правило, образованных объектами из группы «машины и оборудование», например, электрическими линиями, трансформаторами, насосными установками и др. ЭВ вызывают отказы машин и оборудования, нарушающие структуру сетевой системы, причем часто эти отказы являются следствием разрушения зданий и сооружений.

По этой причине часто под инженерным объектом понимается единый комплексный объект. Так под ТЭЦ может пониматься объект, содержащий как здание ТЭЦ, так и оборудование ТЭЦ и выполняющий функцию производства тепловой и электрической энергии.

В инфраструктуру жизнеобеспечения, как правило, включают системы водоснабжения, электроснабжения, газоснабжения, телекоммуникаций и дорожно-транспортную систему.

Эти сетевые системы, влияя друг на друга, могут создавать каскадные эффекты, усугубляющие последствия ЭВ на одну из систем.

По причине своей важности системы жизнеобеспечения проектируются на длительные сроки эксплуатации, которые обеспечиваются высокой надежностью, безопасностью и устойчивостью [2].

Несмотря на указанные свойства, эти системы подвержены многим экстремальным воздействиям таким, как ураганы, землетрясения, наводнения и др. Хотя указанные события являются маловероятными, но они сопровождаются тяжелыми последствиями и потерей системами своей функциональности. Этим объясняется большой интерес в мире к повышению устойчивости инженерных систем вообще и систем жизнеобеспечения, в частности, в экстремальных условиях.

При оценке функциональности инфраструктуры в экстремальных ситуациях используются два ключевых показателя – надежность и устойчивость [3].

Результаты анализа надежности адекватно характеризуют производительность сети, ее способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [4].

Однако, оценку функциональности сложной системы, состоящей из множества взаимосвязанных компонентов в условиях многочисленности и неопределенности потенциальных угроз, затруднительно выполнить в рамках традиционного анализа надежности и риска, и такие условия требуют расширения надежностного подхода, применения дополнительных моделей угроз, уязвимостей, восстановления и оценки устойчивости к экстремальным воздействиям [5].

По указанным причинам для исследования поведения сложных систем в экстремальных условиях развивается методология инженерной устойчивости [6, 7, 8, 9, 10].

Устойчивость функционирования характеризует свойство системы сохранять работоспособность при более широком и разнородном спектре ЭВ в отличие от нормативных условий эксплуатации, для которых задаются требования по надежности. Устойчивость можно рассматривать как качество, снижающее воздействие на элементы системы, в основе которого лежат процессы предотвращения, поглощения, восстановления и адаптации системы [11, 12].

Цель методологии устойчивости заключается в поиске разумного баланса между инвестированием в повышение надежности систем и инвестированием в технические и организационные средства их восстановления [11]. Инвестиции, требующиеся для повышения надежности, при дороговизне модернизации или резервирования, могут направляться на ускорение про-

цесса восстановления посредством совершенствования аварийно-восстановительной техники, транспортно-логистической системы, подготовки специалистов к условиям возможных ЭВ и др.

Литература по устойчивости инженерных инфраструктур содержит обширную библиографию. Особое внимание в представленном обзоре уделено устойчивости инфраструктуры жизнеобеспечения, в части ее электрических и трубопроводных сетевых (водопроводных) систем. Именно, эти системы «представляют собой жизненно важные активы для городов, играя основополагающую роль в поставке основных товаров, необходимых для бесперебойного функционирования городских систем» [13].

Данный обзор больше фокусируется на методах исследования однородных систем, их уязвимости, восстановления и устойчивости, чем на взаимодействии между различными взаимозависимыми системами. При этом большое внимание уделяется применяемым показателям на различных этапах функционирования после ЭВ таким, как показатели ущерба, уязвимости, восстановления, устойчивости.

Представленная работа может способствовать лучшему пониманию текущего состояния в области устойчивости систем жизнеобеспечения и необходимой информации для лиц, принимающих решения в области управления после ЭВ.

Остальная часть статьи структурирована следующим образом. В разделе 2 рассмотрены угрозы и уязвимости систем жизнеобеспечения, приведены основные характеристики для определения уязвимостей. В разделе 3 дана общая характеристика процесса восстановления систем жизнеобеспечения, рассмотрены показатели, используемые для оценки процесса восстановления, а также математические модели и методы исследования этого процесса. В разделе 4 рассматривается устойчивость системы жизнеобеспечения на разных стадиях ее функционирования в условиях экстремальных воздействий, приводятся и анализируются различные метрики для оценки устойчивости. Раздел 5 посвящен дискретно-событийному моделированию, как одному из способов исследования устойчивости. В разделе 6 в общем виде предложена последовательность моделирования устойчивости систем жизнеобеспечения в условиях ЭВ. Раздел 7 содержит заключительные положения статьи.

2. УГРОЗЫ И УЯЗВИМОСТИ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Исследования устойчивости систем жизнеобеспечения к экстремальным воздействиям начинается с определения угроз.

Под угрозой понимается потенциально возможное событие, действие, процесс или явление, которое, воздействуя на объекты системы, может вызвать значительный ущерб. К экстремальным угрозам относят [14]:

- наводнения, штормовые приливы, цунами;
- ураганы, циклоны;
- землетрясения;
- лесные пожары;
- терроризм и др.

Угрозы могут быть классифицированы по различным признакам. Примеры классификаций угроз, основанные на [14], приведены в табл. 1.

Для того чтобы инфраструктура жизнеобеспечения сохранила свои функции в условиях внутренних и внешних угроз, необходимо предварительно изучить ее уязвимость к этим угрозам.

Принято определять уязвимость как параметр, характеризующий возможность нанесения системе повреждений любой природы, и понимать ее как характеристику элемента структу-

ры, либо дефекта структуры или её элементов [15]. Эта характеристика учитывает изменение производительности предоставления услуг при различных сценариях сбоев.

Таблица 1. Классификация основных угроз

№	Признаки угроз	Характеристика признака
1	Вид потенциально ущерба	Физические и естественные угрозы, киберугрозы
2	Природа возникновения	Искусственные (техногенная, военная, террористическая), естественные
3	Направленность	Угрозы безопасности, финансовые угрозы, технологические угрозы, ...
4	Вероятность наступления	Вероятная, маловероятная, с известной частотой (вероятностью) реализации угрозы
5	Характер	Прямая, косвенная угроза

Производительность сети зависит от состояния её элементов и может измеряться ее пропускной способностью по предоставлению услуг [16] или количеством услуг, предоставляемых инфраструктурной системой [17]. Этот показатель наилучшим образом отражает общее определение инфраструктуры, как системы, производящей и распределяющей непрерывный поток основных товаров и услуг.

Уязвимости присутствуют в структуре системы из-за низкого уровня резервирования важных узлов, географического расположения ее элементов или их недостаточной прочности, из-за ошибок в логике работы системы, нарушения сроков технического обслуживания и др. Среди уязвимостей выделяются кибернетические и физические.

Первый вид уязвимостей, во многом, вызван ростом уровня автоматизации и внедрением искусственного интеллекта в инженерные системы при повышении сложности применяемых информационных технологий и используемых в них элементов. Это приводит к увеличению количества точек доступа в системы и росту возможностей для преднамеренного вмешательства в процессы управления. Так, например, объектом массовых атак в последние годы стали системы автоматизация сбора данных и диспетчерского управления (SCADA). Примеры типичных киберуязвимостей приведены в табл. 2 [18].

Таблица 2. Примеры киберуязвимостей инженерных систем

Категория	Киберуязвимости
Уязвимость прикладного программного обеспечения	Плохое качество кода Разрешение и контроль доступа Криптографические проблемы Неправильная конфигурация программного обеспечения
Уязвимость доступа	Управление разрешениями, доступом и привилегиями Неправильная аутентификация Неправильная конфигурация безопасности
Уязвимость сетевого программного обеспечения	Неправильная конфигурация сети Неправильная конфигурация сетевых компонентов Проблемы сетевого аудита и мониторинга

Физические воздействия осуществляются на такие инженерные объекты, как насосные или компрессорные станции, электрические подстанции, трубопроводы, плотины и т.д. Например, воздушные линии распределения и передачи энергии подвержены таким угрозам как снегопады и обледенения. Сооружения в сейсмоопасных зонах подвержены землетрясениям. Вибрации

от них вызывают перемещение грунта, которые слабеют по мере удаления от эпицентра. Показателем интенсивности землетрясения является пиковое ускорение грунта (PGA). Одна из формул для оценки PGA, приведенная в [19], имеет следующий вид

$$\ln PGA = 0,40 + 1,2M - 0,76 \ln R - 0,0094R,$$

где PGA – пиковое ускорение грунта (см/с²), M – магнитуда землетрясения, R – расстояние от эпицентра (км).

Потеря производительности происходит вследствие тех угроз, которые могут повлиять на функциональность системы. Они являются входными данными для анализа устойчивости по этому показателю. Угрозы, начиная с некоторой интенсивности, могут подействовать на определенные уязвимые компоненты системы, вызывая их повреждения. Уязвимость таких компонентов (степень их повреждения) к интенсивности угрозы оценивается через их хрупкость.

Кривая хрупкости показывает вероятность того, что степень повреждения объекта превышает определенный уровень в зависимости от интенсивности воздействия (для землетрясения от PGA). Примеры графиков зависимости вероятности повреждения от пикового ускорения грунта приведены на рис. 1.

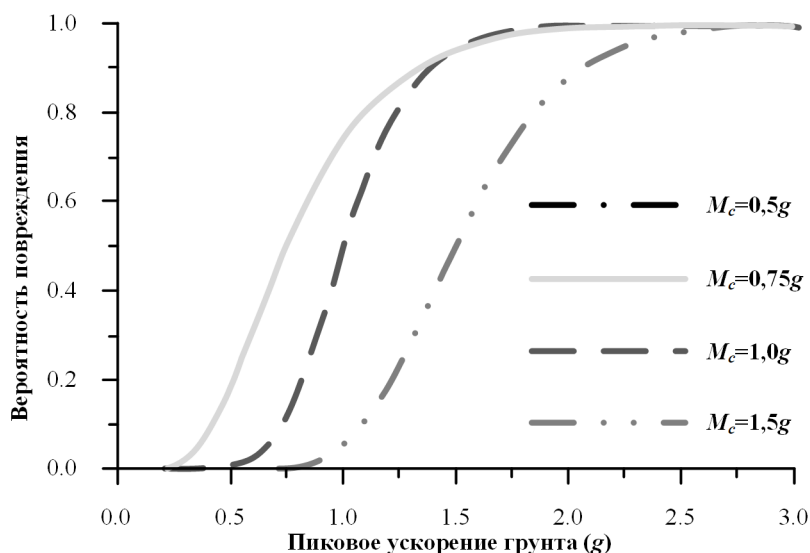


Рис. 1. Пример кривых хрупкости

В литературе представлены кривые хрупкости воздушных линий, как функции скорости ветра, зданий и сооружений, как функции интенсивности вибраций и т.д. Существуют обширные исследования воздействия стихийных бедствий на инженерные сооружения (трубопроводы [20, 21], линии распределительных сетей [22] и т.д.).

На основе концепции хрупкости в [22] предложена модель регрессионного анализа для линий электрической сети, полученная на основе эмпирических данных по уязвимостям при землетрясении. В [23] концепция из [22] изменена и применялась для моделирования воздействий ветра и зимних бурь на электропередач. Применение концепции к исследованию сети электроснабжения, расположенной на обширных территориях, требует большое количество данные о расположении элементов сети и погодных явлениях на исследуемой территории.

При анализе структурных уязвимостей в системах жизнеобеспечения широко применяются сетевые модели: модели, основанные на топологии и модели, основанные на потоках.

В сетевом анализе система абстрагируется как граф вершин (узлов) и ребер (связей). Узлы представляют собой оборудование, в котором услуга производится, преобразуется или распределяется, ребра – соединения между узлами, по которым услуга передается.

В [24] рассмотрены различные топологические характеристики для системы водоснабжения. Однако, по своему влиянию на инженерную устойчивость выделены только некоторые из них такие, как связность сети, эффективность, центральность и модульность. Например, обнаружено, что коэффициент кластеризации слабо коррелирует с характеристиками устойчивости из-за сетчатой структуры системы водоснабжения.

Некоторые из используемых в сетевом анализе топологических характеристик для определения уязвимостей приведены ниже.

1) Потеря связности C [16], вычисляемая по формуле:

$$C = 1 - \frac{n_c}{n},$$

где n_c – количество оставшихся узлов в гигантском связном компоненте после удаления поврежденных (наибольший связанный компонент сети используется в качестве заменителя гигантского связанного компонента), n – общее количество узлов в сети. В невозмущенной системе $C = 0$. Этот показатель часто используется в качестве функции производительности.

2) Случайный выбор объекта воздействий. Случайный выбор характерен для природных катаклизмов (тайфунов, ураганов и т.д.). При таком подходе узлы, удаляемые из графа, определяются путем случайного выбора, в котором каждый узел имеет одинаковую вероятность отказа. Моделируются одиночные и множественные отказы.

3) Выбор по степени. В этом сценарии в качестве отказавших выбираются вершины по мере понижения их степени

$$d_i = \sum_{j=0}^N a_{ij},$$

где d_i – степень i -й вершины графа сети; a_{ij} – элементы матрицы смежности A , которые последовательно удаляются из графа, и рассматривается влияние этих удалений на связность графа.

4) Часто в топологическом анализе степень i -го узла d_i связывается с нагрузкой этого узла. Одним из способов вычисления нагрузки L_i является

$$L_i = \left[d_i \left(\sum_{m \in \Gamma_i} d_m \right) \right]^\alpha,$$

где Γ_i – множество узлов, соседних с i -м узлом, и α является настраиваемым параметром, который может контролировать распределение начальной нагрузки.

5) В сети часто требуется определить кратчайший путь между заданной парой узлов, при этом длина пути равна количеству составляющих его ребер. Более длинные пути часто по своей природе менее «эффективны», чем более короткие [25] и можно предполагать, что их производительность также меньше, чем производительность более коротких путей.

В случае невзвешенной сети длина кратчайшего пути l_{ij} определяется как минимальное количество ребер на пути из вершины i в вершину j . Эффективность e_{ij} связи между вершинами i и j обратно пропорциональна длине l_{ij} кратчайшего пути, то есть $e_{ij} = 1/l_{ij}$. Глобальная (средняя) эффективность E графа G оценивается как

$$E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} e_{ij}, \quad (1)$$

где N – число узлов сети.

После удалении ребра из графа происходит новый поиск кратчайших путей. В результате удлинения кратчайших путей происходит снижение производительности сети.

Для оценки уязвимости инфраструктурных систем, определяемой потерей производительности сети, используется показатель, обратный характеристической длине пути.

6) Выбор по промежуточности узла. При вычислении этого показателя предполагается, что центральность узла определяется числом кратчайших путей, которые проходят через этот узел. Если $|P_{s \rightarrow t}|$ – количество всех возможных кратчайших путей от узла s к узлу t и $|P_{s \rightarrow t}(i)|$ – количество путей, которые проходят через узел i , тогда промежуточность b_i узла i равна

$$b_i = \sum_{s,t \in N_i} \frac{|P_{s \rightarrow t}(i)|}{|P_{s \rightarrow t}|}.$$

Другими словами, промежуточность i -го узла показывает долю всех кратчайших путей между любой парой узлов (s, t) , которые проходят через i -ый узел или, применительно к электрическим сетям, как часто i -ый узел участвует в передаче мощности. В этой модели нагрузка оценивается как промежуточность узла, т.е. числом кратчайших путей, которые проходят через этот узел. При этом сценарии узлы удаляются постепенно, начиная с тех, которые имеют самое высокое значение промежуточности.

В исследованиях по уязвимости, кроме показателей связности в количественной оценке воздействия неблагоприятных событий используются и более сложные топологические характеристики.

Так в [16] представлена кумулятивная функция распределения для оценки уязвимости. В отличие от существующих методологий, эта оценка направлена на получение характеристики уязвимости инфраструктуры, которая учитывает изменчивость производительности предоставления услуг при различных сценариях отказов. Каждому сценарию из k -отказов на основе функции производительности присваивается действительное число, выражающее производительность сети в конфигурации рассматриваемого сценария. Действительные значения, представляющие производительность системы в различных конфигурациях, собираются в вектор уязвимости. Из элементов вектора уязвимости можно получить кумулятивную функцию распределения производительности, представляющую уязвимость системы к нарушениям порядка k . Состояния элементов определяются в двоичном виде 0, 1 в соответствии с работоспособностью элемента.

В [26] предложен метод, использующий нечеткую логику в условиях неопределенности и неточной информации. В силу того, что многие важные данные для инфраструктурных систем могут быть недоступными, для их оценки привлекаются экспертные суждения. Такие знания, основанные на опыте, субъективны по своей природе и вносят неопределенности в процесс моделирования. В этой работе предложена модель с двумя нечеткими системами вывода для моделирования уязвимостей крупномасштабных взаимозависимых инфраструктурных систем, которая способна использовать неточную информацию или знания экспертов.

Преимущества топологического анализа исчезают, когда задачи поиска уязвимостей выходят за рамки связности, например, когда структура сети не нарушается, но уязвимость возникает из-за частичной потери пропускной способности [27]. В таком случае рекомендуется применять потоковые модели.

Другой недостаток применения топологических характеристик проявляется, когда по связности оценивается важность компоненты [28]. Это вызвано тем, что по связности невозможно точно определить вклад компонента в функционирование системы, т.к. на функциональность влияет взаимодействие между компонентами. Поэтому для оценки важности более эффективно исследование наборов компонентов.

Многие из отмеченных недостатков топологического анализа уязвимостей устраняются при применении моделей сетевых потоков или потоковых моделей. С использованием этих моделей рассчитываются потоки в сети, что позволяет при повреждениях компонентов анализировать возникающие перегрузки мощности или частичную потерю производительности в исправных компонентах, учитывать присущую сетям избыточность и возможности реконфигурации. В электроэнергетике с этой целью используются нелинейные и линеаризованные модели потоков мощности [29,30,31,32]. Для моделирования сетевых потоков требуются дополнительные исходные данные о мощностях генерации, пропускных способностях линий и других технических и эксплуатационных характеристиках сетевой системы, что, во многих случаях, затрудняет моделирование. Кроме того, вычислительные затраты при использовании потоковых моделей на порядки выше по сравнению с топологическими моделями [16], что делает их менее удобными для анализа уязвимости при необходимости моделировать большое количество сценариев.

3. ПЛАНИРОВАНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

3.1. Общая характеристика процесса восстановления

Восстановление является важнейшим процессом изменения функциональности системы жизнеобеспечения после ЭВ. При множественных отказах одновременное восстановление работоспособности поврежденных компонентов невозможно в силу ограниченности ремонтных ресурсов. По этой причине важное значение имеет разработка эффективных планов распределения ограниченных ресурсов для восстановления.

Фазы изменения состояния критической инфраструктуры после ЭВ можно разделить на иерархию действий. В [33] определена последовательность действий при восстановлении: планирование, непосредственные работы по восстановлению, завершение восстановления.

Планирование включает определение целей восстановления, разработку стратегий восстановления и обеспечение необходимых ресурсов для восстановления. Целями могут быть минимизация сроков восстановления, затрат, неудовлетворенного спроса и др. Стратегия восстановления определяет действия, которые необходимо выполнить для достижения поставленных целей. К ним относятся действия, основными из которых являются осмотр, оценка повреждений, ремонт, контроль качества работ и тестирование. Самый низкий уровень действий – это определение специализированных бригад, оборудования, средств и методов.

Задачи стратегии для восстановления сетевой инфраструктуры представлены на рис. 2. В задаче «Анализ важности поврежденных компонентов» формируется приоритет компонентов, вытекающий из целей и действующих факторов. Такими приоритетами могут обладать компоненты, предоставляющие энергию больницам, школам и др. В сетевой системе только приоритета по важности недостаточно для распределения ремонтных активов. Необходимо определить достижимость важных поврежденных компонент из источников ресурса, что на рис 2 изображается связью «приоритет по доступности».

3.2. Показатели, используемые для оценки процесса восстановления

Для оценки характеристик процесса восстановления инженерных инфраструктур, как правило, используется показатель производительности. Этот показатель наилучшим образом отражает общее определение инфраструктуры, как системы, производящей и распределяющей непрерывный поток основных товаров и услуг. В литературе были предложены различные индикаторы производительности критической инженерной инфраструктуры. Часть из них использует топологические свойства сетей. Производительность сети зависит от состояния её элементов и может измеряться ее пропускной способностью по предоставлению услуг или количеством услуг, предоставляемых инфраструктурной системой [17], уравнением баланса между

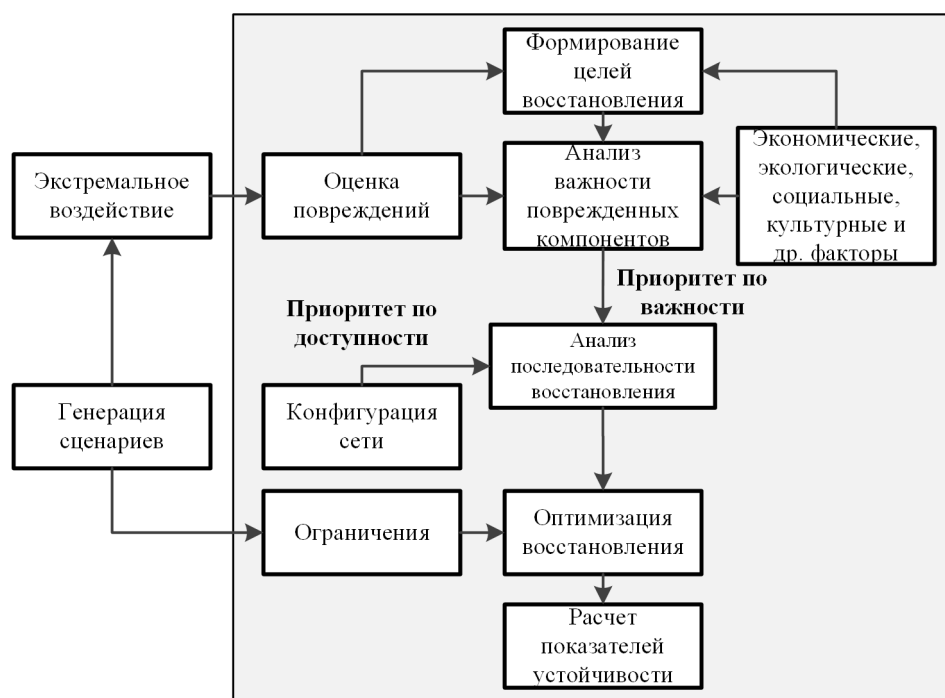


Рис. 2. Задачи стратегии восстановления

спросом и предложением (2), функциональностью элементов системы (3) [16] и др. Функции ниже отражают способность инфраструктуры предоставлять услуги обществу.

$$B = \sum_{i \in D} d_i - \sum_{j \in S} s_j, \quad (2)$$

где B – доступность услуги; d_i – спрос в узле i ; D – набор узлов спроса; s_j – предложение в узле j ; S – набор узлов предложения.

$$F = \frac{n_f}{n}, \quad (3)$$

где F – функциональность элементов, n – количество узлов в сети; n_f – количество функциональных узлов в сети.

В [23] на примере сетчатой структуре распределительной системы водоснабжения показано, что топологических метрик недостаточно для проектирования устойчивых систем. Предлагается измерять производительность системы по нескольким показателям, соответствующим её сопротивлению, способности к поглощению и восстановлению.

В [21] для количественной оценки производительности системы при восстановлении используется показатель, называемый «работоспособностью системы», который рассчитывается как отношение фактического предложения к требуемому спросу всей сети.

В [34] рассматриваются критически важные сети водоснабжения, газоснабжения, электро-снабжения, связи и транспортные системы, которые имеют решающее значение для удовлетворения основных потребностей общества и поддержания качества его жизни. Подчеркивается важность социальных аспектов и демографических данных для снижения социальных рисков из-за ЭВ, их учета в планировании процессов восстановления и определении их приоритетности. Тем самым ресурсы восстановления направляются в социально значимые пострадавшие районы. Для оценки воздействия на общество используются индексы социальной уязвимости и плотность населения обслуживаемых территорий.

В [35] предложен показатель качества восстановления предоставляемых системой услуг при планировании. Для этого на каждом шаге процесса восстановления выбирается такой набор узлов и дуг, чтобы их ремонт максимизировал объем (взвешенного) спроса, который может быть передан от узлов предложения к узлам спроса.

3.3. Математические модели и методы

При планировании восстановления применяются различные математические модели и методы.

В [36] существующие подходы к планированию восстановления сети, условно разделяются на две группы. К первой группе отнесены методы математического программирования, другие методы отнесены к группе моделирования.

Среди второй группы в качестве приоритетных указываются сетевые, агентные, модели, основанные на марковских процессах, статистические методы [37], входо-выходные модели В. Леонтьева [27]. К ним в [38] добавлены методологии, основанные на машинном обучении, ускоряющие процесс планирования восстановления благодаря своим мощным возможностям обработки данных и прогнозирования.

Как правило, указанные методы используются в комбинации с методами оптимизации для формулирования целостной модели решения задачи восстановления.

В [28] обосновывается приоритет моделей оптимизации для решения задач восстановления по сравнению с другими видами моделей – топологических, потоковых и др. Это объясняется наличием целей в задачах восстановления и ограничений (экологических, экономических и других) и тем, что правильно сформулированные цели и ограничения характеризуют поведение системы, близкое к реальному. По этой причине модель оптимизации может являться базовой, в том числе, для оценки последствий в сценариях, связанных с отказами компонентов. Для этого осуществляется многократный запуск модели оптимизации при разных сценариях отказов.

Подход математического программирования формулирует проблему восстановления как нелинейную или линейную математическую модель оптимизации целевых функций. Ими могут быть максимальное значение показателя устойчивости, максимальная производительность, минимальное время восстановления, максимальный поток или его мощность, минимальные потери. В качестве приоритетов восстановления выступают допустимое время восстановления, доступные ресурсы, стоимость, мощность сети [8].

В [39] применяется двухэтапная модель распределения ресурсов восстановления. Цель первого этапа – быстрое восстановление динамической устойчивости инфраструктурных систем для удовлетворения основных потребностей пользователей. Второй этап направлен на минимизацию общих потерь в последующем процессе восстановления.

При планировании восстановления широко используется смешанно-целочисленное программирование и его варианты. Так в [40] разрабатывается модель смешанно-целочисленного программирования для создания стратегии восстановления с минимальной стоимостью частично разрушенной инфраструктурной сети в зависимости от бюджета, ресурсов и эксплуатационных ограничений. В указанной модели все параметры являются детерминированными, например, данные о ресурсах и продолжительность восстановительных работ и др.

Для учета неопределенностей в задаче применяется стохастическое программирование. Так в [41] предложена модель стохастической оптимизации, учитывающая эффекты неопределенного времени восстановления и доступности ресурсов после сбоя критических инфраструктурных сетей. Модель стохастического программирования предложена в [42]. Она находит

решения о расположении объекта и восстановлении при неопределенной продолжительности восстановления сети.

Поскольку задачи принятия решений о восстановлении критической инфраструктуры являются NP-трудными, эти математические модели требуют значительных затрат времени. Поэтому для решения этих задач за приемлемое время применяются методы, основанные на важности, метаэвристические алгоритмы.

Важность компонента для системы может быть измерена по типам компонентов (например, генератор и подстанция), топологическим характеристикам (степень, промежуточность и др.) и влиянию повреждения компонента на функциональность системы. В ряде работ важность (приоритет восстановления) среди поврежденных объектов устанавливается, исходя из оценки социальной уязвимости и плотности населения в районе проживания.

Метаэвристические алгоритмы, такие как генетические и алгоритмы имитации отжига, могут обеспечить оптимальные или близкие к оптимальным решения для задач принятия решений о восстановлении.

Так в [39] представлена оптимизированная стратегия распределения ресурсов на восстановление, которая повышает эффективность этого процесса при ограниченном бюджете на восстановительные ресурсы. Эта стратегия реализуется с использованием двухэтапной модели распределения ресурсов, в которой применяется генетический алгоритм. На первом этапе ресурсы распределяются таким образом, чтобы минимизировать время восстановления критически важных объектов для удовлетворения основных потребностей пользователей. На втором этапе учитывается ограниченность бюджета на восстановительные ресурсы и поэтому целью распределения ресурсов становится минимизация общих потерь в ходе последующего процесса восстановления.

Непрерывная подача электроэнергии после природных и техногенных катастроф не может быть обеспечена без приоритизации нагрузок и ресурсов при разработке стратегии необходимо определить состав элементов, подлежащих ремонту, и очередность (порядок) устранения повреждений с учетом приоритетов потребителей, оставшихся без ресурсов. Например, в первую очередь должно выполняться восстановление тех элементов, которые обеспечивают ресурсами более значимых потребителей (потребителей первой категории). В других случаях восстановление должно проходить так, чтобы ресурсы предоставлялись всем потребителям, но при ограниченных объемах поставок и т.д. В зависимости от приоритетов формируются пути снабжения ресурсами и состав ремонтируемых элементов. Ясно, что эти пути могут не повторять те, которые существовали до кризиса.

В [8] в рамках решетчатой структуры системы водоснабжения рассмотрены три широко применяемые стратегии: восстановление от периферии (PR), восстановление на основе веса узла (PRNW) и локализованное восстановление (LR). Вес узла, как правило, связывается со значимостью подключенных к нему потребителей (больницы, заводы, школы и др.), которых этот узел обеспечивает ресурсом. Согласно стратегии PR, восстановление начинается с выбора изолированного узла с наибольшим весом, соседнего с функциональным узлом, т.е. с узлом, получающим ресурс, и ремонта связывающей их линии. Так как соседних функциональных узлов в решетке может быть больше одного, то выбор линий для восстановления происходит случайным образом. После того, как на текущем шаге все изолированные узлы одного веса оказались подключенными, на следующем шаге выбирается другой изолированный узел с наибольшим весом, соседний с функциональным узлом сети и выполняется ремонт связывающей их линии и т.д. В стратегии PRNW преимущество в восстановлении отдается линиям, которые связывают, в первую очередь, изолированный узел с наибольшим весом с функциональным узлом сети и связям этого узла с другими значимыми узлами. Выбор поврежденных линий, инцидентных функциональному узлу, также происходит случайным образом. В стратегии LR

восстановление начинается с выбора корневого узла и исправления его поврежденных связей. Связи остальных узлов восстанавливаются в порядке удаления этих узлов от корневого узла, независимо от их веса. В этих стратегиях используется постепенное пошаговое восстановление линий и снабжение инцидентных им ранее изолированных узлов.

В [35] решается задача восстановления, как задача проектирования оставшейся функциональной после ЭВ части инфраструктуры, за счет пошагового присоединения к ней восстанавливаемых компонентов. Для выбора таких компонентов вводится эвристическое правило диспетчеризации, согласно которому выбирается путь от источников к потребителям, на котором ремонтируются повреждённые компоненты. Выбранный путь дает наибольший выигрыш в производительности системы, которая оценивается общим объемом потока в функциональной части сети от всех источников ко всем потребителям. Указанный подход позволяет упростить задачу восстановления и применить для оптимизации метод целочисленного программирования.

К этому же классу относится задача реконфигурации сети с диспетчеризацией ремонтных бригад. В [43] предлагается модель смешанно-целочисленного линейного программирования, которая совместно оптимизирует диспетчеризацию ремонтных бригад, мобильных энергетических систем и микросетей для восстановления питания, где микросети используются для реконфигурации сети. Авторы минимизируют общие взвешенные нагрузки, включая ограничения на время перемещения и ремонта ремонтной бригады, балансируя спрос и предложение энергосетей и потребности в нагрузке.

В [44] рассмотрен метод предварительного планирования восстановительных работ, основанный на использовании статистических данных по ранее завершённым восстановительным мероприятиям на объектах и территориях. Такая информация по продолжительности мероприятий и использованных ресурсах накапливается в базах данных в виде кривых восстановления производительности и может быть использована аналитиками при создании прогнозных моделей восстановления для новых сценариев ЭВ. Для этого выполняется адаптация кривых к условиям рассматриваемого сценария ЭВ: уровню повреждения, ремонтпригодности системы, доступности поврежденных компонентов, ресурсов и др.

В [45] предлагается вероятностный подход к восстановлению и вычисляются ориентировочные оценки ожидаемого времени восстановления на основе статистики по восстановлению инфраструктуры электроснабжения, водоснабжения, газоснабжения и телекоммуникаций после катастроф различных типов. В качестве преимущества выбранного подхода называется использование эмпирических данных, их масштабируемость на сходные события, отсутствие необходимости в подробной модели.

На рис. 3 представлены средние кривые восстановления для системы электроснабжения и телекоммуникационной инфраструктуры [45]. Жирной линией обозначены кривые после землетрясений, остальные – после других стихийных бедствий. Инфраструктура телекоммуникаций показывает самую высокую скорость восстановления и, как следствие, самый высокий уровень устойчивости.

Разработанные модели применялись при исследовании процессов восстановления систем жизнеобеспечения после землетрясения в Новой Зеландии. Зависимости производительности от времени восстановления представлены на рис. 4 [45].

В последнее время быстрое развитие и применение искусственного интеллекта предоставило мощные инструменты для анализа устойчивости инженерных инфраструктур. Так в [38] среди методологий, широко применяемых для управления устойчивостью, рассматривается управление данными и машинное обучение с учётом физических процессов.

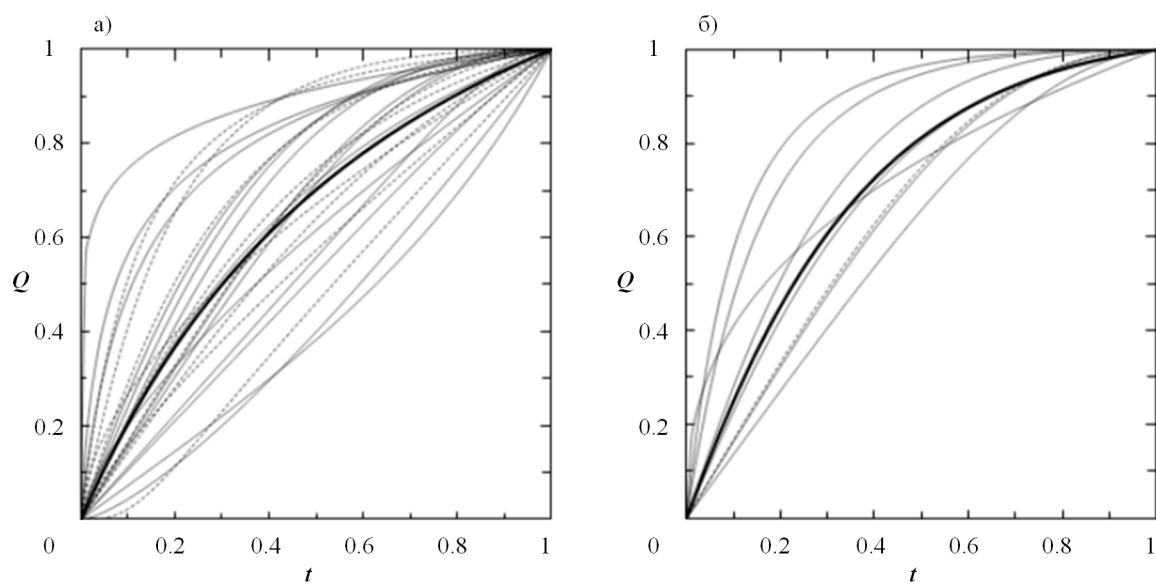


Рис. 3. Безразмерные средние кривые восстановления для: а) системы электроснабжения; б) телекоммуникационной инфраструктуры

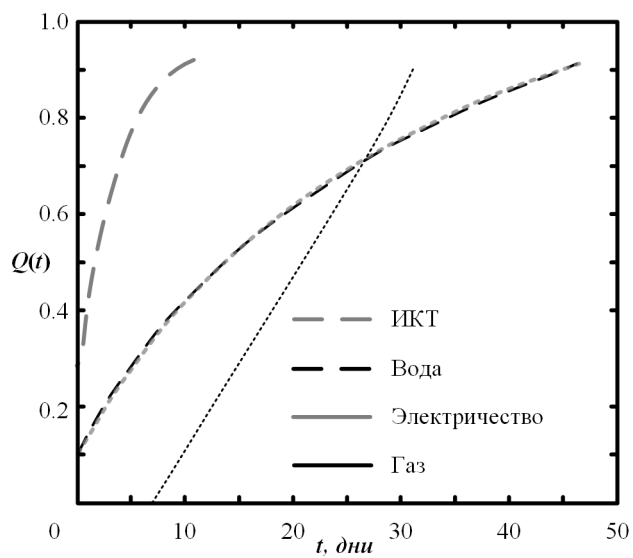


Рис. 4. Смоделированные кривые восстановления инфраструктур в сценарии до 90% восстановления первоначального сбоя

4. УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Устойчивость является многомерным понятием, и на данный момент не существует его общего определения [46, 47].

В литературе приводятся различные определения устойчивости, например, в [10] – это способность системы противостоять сбоям (предотвращать и выдерживать), поглощать первоначальный ущерб и восстанавливаться после них до нормального режима работы. В то же время в [48] устойчивость понимается как способность сети противостоять, поглощать, адаптироваться и восстанавливаться под влиянием ЭВ.

Эти и другие определения дают представление об основных свойствах устойчивости, таких как робастность, избыточность, скорость реакции, ресурсообеспеченность [49] и др.

Как указано выше, устойчивость системы при ЭВ можно охарактеризовать с точки зрения ее производительности [6, 9, 50, 51]. Природные или другие события воздействуют на систему, вызывая отказы ее компонентов и тем самым снижая уровень производительности системы.

Во многих исследованиях, например, в [6, 9, 52, 53] при описании сценариев таких воздействий выделяют стадии или фазы функционирования системы, которые в совокупности представляют собой “цикл устойчивости” [54]. Количество стадий и их названия варьируется, каждая стадия характеризуется изменением с течением времени выбранного показателя эффективности в рамках конкретного сценария [55].

Процесс изменения производительности системы до, во время и после ЭВ можно представить в виде кривой устойчивости, которая показывает изменение выбранного показателя производительности [17]. Производительность находится на номинальном уровне, затем снижается из-за ЭВ, вызвавшего отказы компонентов системы, далее в процессе их ремонта восстанавливается к заданному уровню.

Пример такой кривой приведен на рис. 5, где $P_n(t)$ – базовый (или номинальный) уровень производительности системы в нормальных условиях. Рассматривается сценарий, при котором чрезвычайное событие воздействует на систему с момента времени t_0 , вызывая снижение ее производительности (кривая $P_c(t)$ на рис. 5). На рис. 5 обозначены четыре стадии функционирования системы рассматриваемого сценария.

На стадии I, которую, как правило, называют стадией поглощения (или деградации) ЭВ приводит к повреждениям и отказам оборудования системы и нарушению ее функционирования, в результате чего производительность падает до определенного уровня (кривая $P_c(t)$ на временном интервале (t_0, t_1) на рис. 5). Такое падение частично компенсируется за счет резервирования путей доставки ресурса, дополнительных мощностей его производства и т.д.

На стадии II «оценка последствий» производительность системы стабилизируется (кривая $P_c(t)$ на временном интервале (t_1, t_2) на рис. 5), специалисты экстренных служб оценивают масштабы разрушений, разрабатываются стратегии восстановления: определяется последовательность ремонтов, планируются сроки восстановления, необходимые материальные, технические, людские и другие ресурсы с учетом ограничения; среди разработанных стратегий по определенному критерию выбирается оптимальная стратегия. Кроме того, проводятся подготовительные работы для обеспечения безопасности ремонтных бригад при восстановлении: осуществляется разбор завалов, тушение пожаров и т.д.

Затем на стадии восстановления III, согласно выбранной стратегии, осуществляется ремонт поврежденных компонентов системы. В процессе выполнения указанных работ контролируются определенные ранее ограничения, в случае сдвига сроков, недостатка ресурсов и т.п. выбранная ранее стратегия может быть скорректирована. При этом производительность системы возрастает и постепенно возвращается к докризисному уровню (кривая $P_c(t)$ на временном интервале (t_2, t_3) на рис. 5).

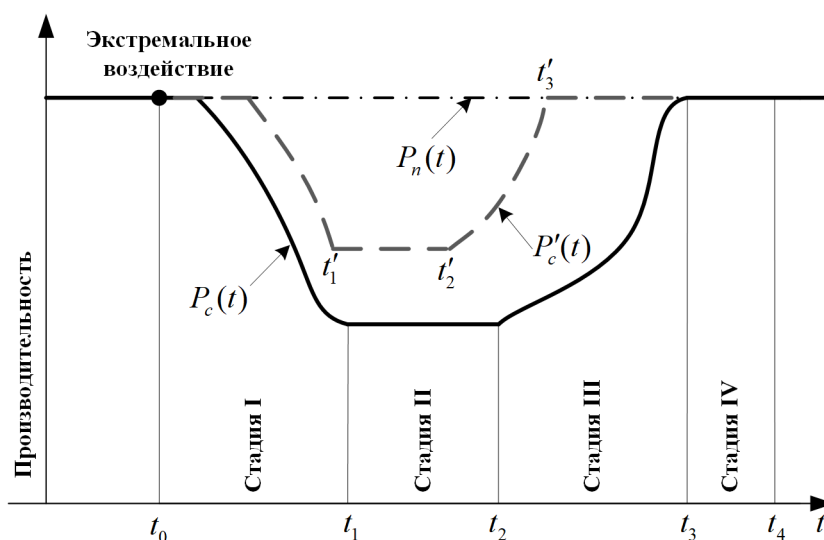


Рис. 5. Стадии и графики изменения производительности сети при ЭВ

После окончания восстановительных работ на стадии IV, названной «адаптация», выполняется детальный анализ информации о возникшей кризисной ситуации, ее последствиях и эффективности деятельности по ее устранению. Результатом такого анализа является планирование и реализация мероприятий по повышению устойчивости системы: осуществляется поиск и устранение уязвимостей, дополнительное обучение и тренировки персонала и аварийных бригад, закупка и складирование дополнительного оборудования и материалов и т.д. На графике на рис. 5 данная стадия обозначена на временном интервале (t_3, t_4) . Фактически деятельность на стадии адаптации в той или иной степени должна вестись на протяжении всего времени нормального функционирования системы.

Часто выделяют еще одну или две стадии, предшествующие моменту времени t_0 , например, стадии «анализ рисков» и «предвидение/подготовка» [54], на которых осуществляется выявление и мониторинг рисков и проводятся упреждающие мероприятия по их минимизации.

Как видно из рис. 5 (кривая $P'_c(t)$ на временном интервале (t_0, t'_3)), в результате проведенных мероприятий по повышению устойчивости минимизируется падение уровня производительности на всех стадиях функционирования системы при ЭВ, кроме того, каждый из обозначенных интервалов сокращается.

Для анализа функционирования системы при ЭВ необходимо количественно оценивать устойчивость. Показатели устойчивости используются при разработке стратегий восстановления, а также для решения других задач, например, при определении критических компонентов системы, сравнении ее конфигураций [17]. На текущий момент не существует единого подхода к количественной оценке устойчивости [17, 56]. Так в [57] отмечается, что выбор стратегии восстановления после ЭВ зависит от специфики рассматриваемого показателя устойчивости.

При исследовании влияния ЭВ на такие системы, как электроснабжение, водоснабжение, газоснабжение, устойчивость часто связывают с обеспеченностью ресурсом потребителей [58]. При оценке устойчивости транспортных сетей рассматриваются такие показатели, как время в пути, связанность, доступность и пропускная способность [48].

В последние годы разработано большое количество показателей устойчивости [9, 10, 52] и др. с учетом таких аспектов как надежность, восстанавливаемость, адаптивность и др.

В [17] приводится классификация показателей, включающая: интегральные метрики; метрики величины производительности; метрики длительности; метрики скорости реакции; пороговые метрики, ансамблевые метрики.

Во многих исследованиях широко используется интегральные метрики устойчивости. Они включают в себя показатели времени и производительности. Две наиболее распространенные среди них определяют суммарные потери производительности и нормализованную суммарную производительность системы. Первая определяется интегрированной разностью между номинальным и текущим значением производительности и для графика на рис. 5 может быть рассчитана как

$$\Phi = \int_{t_0}^{t_4} (P_n(t) - P_c(t)) dt,$$

где $P_c(t)$ – реальная (текущая) производительность системы на интервале времени (t_0, t_4) , $P_n(t)$ – производительность при нормальном функционировании сети.

Вторая метрика, используемая, например, в [10], для графика на рис. 5 рассчитывается по формуле

$$\Phi = \frac{\int_{t_0}^{t_4} P_c(t) dt}{\int_{t_0}^{t_4} P_n(t) dt}.$$

С использованием метрик, основанных на величине производительности, таких как остаточная производительность, восстановленная производительность и т.д., количественно оценивается состояние системы на определенной стадии или в определенный момент времени на кривой устойчивости.

Метрики, основанные на длительности, оценивают время на стадиях кривой устойчивости на рис. 5. С использованием метрик, основанных на скорости, оценивается изменение производительности во времени, как правило, на стадиях деградации и восстановления кривой устойчивости (см. рис. 5).

В ряде исследований [33, 49] подчеркивается, что кривая устойчивости не может быть полноценно охарактеризована одной метрикой на разных стадиях ее функционирования. Так в [33] приводятся три различные кривые восстановления и указывается, что для всех трех интегральная метрика имеет одинаковое значение (см. рис. 6). То есть для оценки устойчивости должны использоваться системы показателей.

Примером такой системы показателей является методология ФЛЕП для количественной оценки устойчивости энергосистемы, описывающая состояния системы на стадиях функционирования при ЭВ [9].

Показатели (4) и (5) отражают, насколько быстро и насколько низко снижается устойчивость (стадия I на рис. 5) соответственно, и вычисляются по формулам

$$\Phi = \frac{P_c(t_1) - P_c(t_0)}{t_1 - t_0}, \quad (4)$$

$$\Lambda = P_c(t_1) - P_c(t_0). \quad (5)$$

С использованием показателя (6) измеряется время, в течение которого система остается в ухудшенном состоянии после нарушения, вызванного ЭВ (стадия II на рис. 5):

$$E = t_2 - t_1. \quad (6)$$

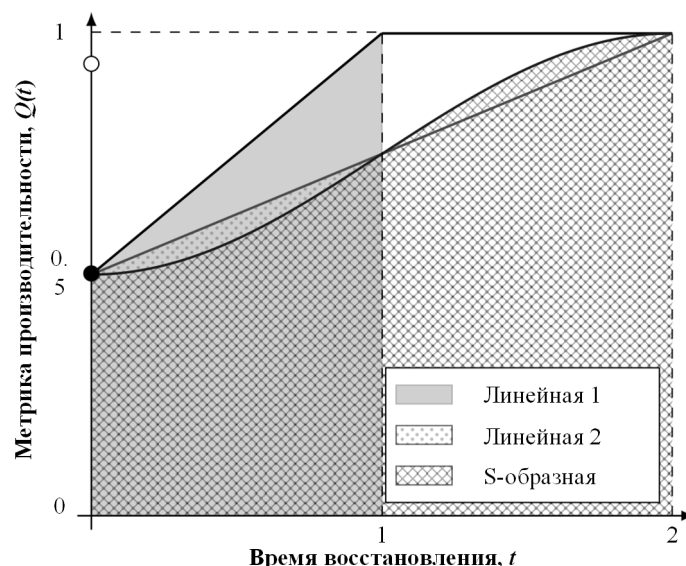


Рис. 6. Кривые восстановления с одинаковым значением интегральной метрики устойчивости

Показатель (7) отражает, как быстро восстанавливается система после ЭВ (стадия III на рис. 5):

$$\Pi = \frac{P_c(t_3) - P_c(t_2)}{t_3 - t_2}. \quad (7)$$

Показатели (4) и (5) используются в [31] для определения критических компонентов системы электроснабжения при моделировании каскадных процессов с использованием потоковой модели переменного тока на стадии поглощения.

Согласно классификации [17] показатели (4) и (7) относятся к метрикам скорости, показатель (5) – к метрикам величины производительности, а показатель (6) – к метрикам длительности. В качестве дополнительного показателя в [9] используется интегральная метрика.

Пороговые метрики устанавливают критическое значение величины производительности, которое неприемлемо для системы, или времени ее восстановления, при которых система должна достичь определенного уровня производительности.

В [59] рассматривается методология, включающая линейную динамическую модель системы, состоящей из взаимозависимых подсистем газоснабжения и электроснабжения и анализ устойчивости. При этом устойчивость системы определяется обеспеченностью ресурсами ее потребителей в соответствии с пороговыми значениями, вводится также пороговое значение времени, которое влияет на скорости восстановления отказавших компонентов системы.

В [56] отмечается, что система устойчива, когда снижение производительности меньше определенного порога и время для полного восстановления такой системы не превышает некоторого предельного значения. Исходя из этого утверждения предлагается количественный показатель степень устойчивости (RP), который вычисляется по формуле:

$$RP = \exp \left[\frac{\int_{t_0}^{t_0+T} X(t) dt}{Q_0 T^*} \right], T = \max T_1, T_2,$$

где Q_0 – номинальное значение производительности; T^* – предельное значение времени восстановления, $X(t)$ – потеря производительности системы в реальном времени, t_0 – момент

времени возникновения ЭВ; T_1 – время реакции и самовосстановления за счет существующих внутренних возможностей без внешнего вмешательства; $(T_2 - T_1)$ – время ремонта после самопроизвольного восстановления.

Ансамблевые метрики представляют собой сводные показатели, включающие несколько индикаторов. Такие метрики часто представляют собой взвешенную сумму или взвешенное произведение и являются частой представляются собой безразмерные величины. Среди них выделяют ансамбли метрических функций – полученные объединением показателей на одной кривой производительности, ансамбли показателей эффективности – рассматриваются несколько показателей эффективности для одного сценария, ансамбли сценариев – рассматриваются сводные показатели для нескольких сценариев воздействий, различных конфигураций системы и т.д. Примеры ансамблевых метрик приведены ниже.

В [60] для поиска оптимальной стратегий восстановления в киберфизической системе электроснабжения рассматривается задача нелинейного целочисленного программирования, где в качестве целевой функции выступает годовой составной показатель устойчивости ACR, рассчитываемый по формуле:

$$ACR = \lambda T [E(SI) + \alpha E(TRE)],$$

где $E(SI)$ и $E(TRE)$ – ожидаемое снижение производительности системы и объем ресурсов, затраченных в процессе восстановления с учетом всех интенсивностей ЭВ соответственно, α – неотрицательный весовой коэффициент, который обеспечивает преобразование единиц и определение относительной важности между $E(SI)$ и $E(TRE)$, T – годовой временной интервал. В качестве ограничений выступают общее время восстановления, экономические затраты, объем ресурсов каждого вида, необходимых для восстановления, приоритеты ремонтируемых объектов и режим их восстановления.

В [61] рассматривается устойчивость распределительной системы водоснабжения, которая измеряется производительностью. Производительность в каждом из узлов системы оценивается двумя индексами: давлением и качеством воды. Затем рассчитываются суммарные показатели с учетом спроса, а итоговая метрика включает оба показателя в виде суммы с нормализованными весовыми коэффициентами.

В [62] с помощью предложенной ансамблевой метрики эффективности R оценивалась функциональность распределительной системы водоснабжения в сейсмоопасном районе. Эта метрика представляет собой произведение показателей спроса на воду (R_1), вычисляемого по количеству потребителей, пропускной способности (R_2), рассчитываемого по уровню воды в резервуаре и качества воды (R_3). На основе показателей R_1 и R_2 формируется агрегированный показатель для трех сценариев работы системы.

В [54] вычисляются показатели устойчивости на каждой стадии функционирования системы для нескольких аспектов устойчивости, таких как технический, организационный и др. В результате строится матрица устойчивости, включающая оценки на каждой стадии по каждому аспекту. Рассчитанные количественные показатели рассматриваются на шкале оценки устойчивости, состоящей из пяти уровней от “устойчивость очень низкая” до “устойчивость очень высокая”. Упрощенные оценки типа “низкий” выставляются экспертами и представляют собой агрегированные значения.

В процессе поиска стратегии восстановления в задачах оптимизации в качестве целевой функции могут использоваться разные метрики устойчивости. Например, в [58] рассматривается система, состоящая из взаимозависимых электрической сети и киберсети связи. На первом этапе минимизируются необслуживаемые нагрузки. На втором этапе, после восстановления электроснабжения потребителей минимизируется время ремонта остальных отказавших компонентов.

Функционирование систем жизнеобеспечения происходит в случайной среде. Поэтому при оценке устойчивости важно учитывать различные факторы неопределенности. Например, различные варианты отказов могут возникать даже при одинаковой интенсивности ЭВ [63]. Для таких сценариев в литературе определяются стохастические показатели устойчивости.

Например, в [63] предложен метод «анализа надежности-избыточности $(\beta - \pi)$ » для оценки устойчивости при ЭВ. Для каждого начального сценария на основе вероятности отказов компонентов системы вычисляются индексы надежности (β) и избыточности (π) , строится диаграмма $\beta - \pi$, выполняется комплексная оценка данных индексов и определяются критические сценарии. Расчет индексов надежности и избыточности для сценария с отказом i -го компонента при реализации j -ой угрозы H_j выполняется по следующим формулам:

$$\beta_{ij} = -\Phi^{-1} [P(F_i|H_j)],$$

$$\pi_{ij} = -\Phi^{-1} [P(F_{sys}|F_i, H_j)].$$

где Φ^{-1} – обратная кумулятивная функция нормального распределения; $P(F_i|H_j)$ – вероятность отказа i -го компонента F_i при реализации угрозы H_j ; $P(F_{sys}|F_i, H_j)$ – вероятность отказа системы F_{sys} при отказе ее i -го компонента в результате каскадного сбоя. Если угроза H_j представляет собой землетрясение с определенной интенсивностью, то для вычисления вероятности $P(F_i|H_j)$ используется сейсмическая хрупкость.

В [57] предложена модификация индекса надежности из [63]:

$$\beta_{ij} = -\Phi^{-1} [P(F_i|H_j)] \lambda_{H_j},$$

где λ_{H_j} – частота возникновения угрозы H_j .

Кроме того, в [57] отмечается, что помимо оценки надежности и избыточности необходимо также учитывать последствия ЭВ, для этого вводятся следующие показатели затрат:

$$E[C_{i,j}] = \Phi(-\beta_{ij}) c_{F_j},$$

$$E[C_{s,i,j}] = \Phi(-\pi_{ij}) \Phi(-\beta_{ij}) c_{sys},$$

где $E[C_{i,j}]$ – ожидаемая стоимость i -го сценария от угрозы H_j , $E[C_{s,i,j}]$ – ожидаемая стоимость отказа системы после i -го сценария от угрозы H_j , c_{F_j} – прямые затраты, вызванные i -ым сценарием, c_{sys} – затраты, связанные с отказом системы.

Общие ожидаемые затраты, связанные со всеми возможными сценариями угрозы H_j , вычисляются по формуле:

$$E_j = \sum_{i=1}^n E[C_{i,j}] + \sum_{i=1}^n E[C_{s,i,j}],$$

где n – количество сценариев угрозы H_j .

В [63] указано, что для полноценной оценки устойчивости метод $(\beta - \pi)$ должна быть дополнена показателем восстанавливаемости.

5. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ

Сценарный подход и имитационное моделирование является методом, широко используемым для решения задач устойчивости и, в частности, восстановления [36].

Для исследования последовательности действий, выполняемых в определенных временных интервалах, широко применяется дискретно-событийное моделирование (DES). В частности, в связи с естественным разделением на временные интервалы графика изменения производительности на рис. 5, DES можно эффективно применять для оценки устойчивости. Описанные выше стратегии восстановления определяют события и действия на определенных временных интервалах, которые необходимо выполнить для достижения поставленных целей [33]. Такими событиями являются повреждение компонентов в результате ЭВ, оценка повреждений, окончание ремонт каждого поврежденного компонента, контроль качества работ и тестирование.

Проектирование DES состоит из задания сущностей, событий и ресурсов, и их отношений. Примерами сущностей для систем жизнеобеспечения могут быть подстанции, мосты, участки трубопроводов и т.д. События связаны с изменением состояния таких сущностей или ресурсов в результате предпринимаемых действий. Ресурсы представляют собой активы для восстановления, такие как ремонтный персонал, техника, финансы и др., как правило, ограниченные по величине. Сценарии моделируются изменением интенсивности угроз, видов уязвимостей, длительностей событий, состояния ресурсов и т.д. Так в [64] представлена дискретно-событийная имитационная модель, в которой события инициируют запрос на ресурсы и/или услугу по восстановлению жилых строений, оснащенных системами водо- и электроснабжения. Заданное действие может быть смоделировано с необходимой детализацией. Например, процесс оценки ущерба может представлять собой графики работы инспектора и время в пути до каждого поврежденного объекта. Продолжительность осмотра, необходимая для оценки ущерба, можно представить с использованием соответствующего распределения вероятностей, что делает дискретно-событийную имитационную модель стохастической.

В [21] разработана имитационная система для моделирования восстановления водопроводных сетей после землетрясения. Модель используется для разработки стратегии восстановления и повышения устойчивости поврежденной сети к землетрясениям. Возникновение повреждений моделируются с использованием различных сценариев сейсмического воздействия, учитывающих расположение эпицентра и сейсмическую магнитуду, а также моделей хрупкости узлов и агрегатов водопроводных сетей. Модель вычисляет гидравлические потоки, определяет последовательность ремонта и распределение ремонтных бригад.

В [65, 66] описан инструмент WNTR на языке Python, который позволяет моделировать сложные состояния систем распределения воды, объединяя моделирование гидравлики, оценку ущерба и показатели устойчивости в единую платформу. Сетевые файлы представляют собой набор труб, насосов, клапанов, соединений, баков и резервуаров. Пакет обеспечивает гибкость при внесении изменения в сеть для рассмотрения различных сценариев ЭВ таких, как срабатывание запорных клапанов управления потоком воды, землетрясений, утечки, отказы насосов, отключение электроэнергии и др. С использованием данного пакета выполняется оценка доступности водоснабжения и времени восстановления в зависимости от магнитуды землетрясения, местоположения и стратегии ремонта.

В этом пакете для оценки устойчивости могут использоваться следующие метрики.

1) Доступность услуг водоснабжения – это гидравлическая метрика представляет собой отношение предоставленного потребительского спроса к ожидаемому (запрашиваемому) спросу. Этот показатель отражает количество воды, которое пользователь фактически получит во время инцидента, по сравнению с количеством, которое он получал бы в обычном режиме.

2) Индекс Тодина – гидравлическая метрика характеризует устойчивость как отношение избыточной внутренней мощности к максимальной мощности за заданный период времени.

3) Метрики оценки прочности связей в системе водоснабжения (например, количества труб, обслуживающих данный узел).

4) Качества воды. Эти метрики количественно определяют концентрацию загрязняющих веществ или возраст воды.

5) Водообеспеченности. Метрики измеряют возможное воздействие загрязнённой воды на потребителей.

6) Экономические. Эти метрики измеряют затраты, связанные с эксплуатацией системы водоснабжения, а также выбросы парниковых газов.

6. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

По результатам проведенного анализа предлагается последовательность моделирования устойчивости в условиях экстремальных воздействий, состоящая из этапов, приведенных на рис. 7.

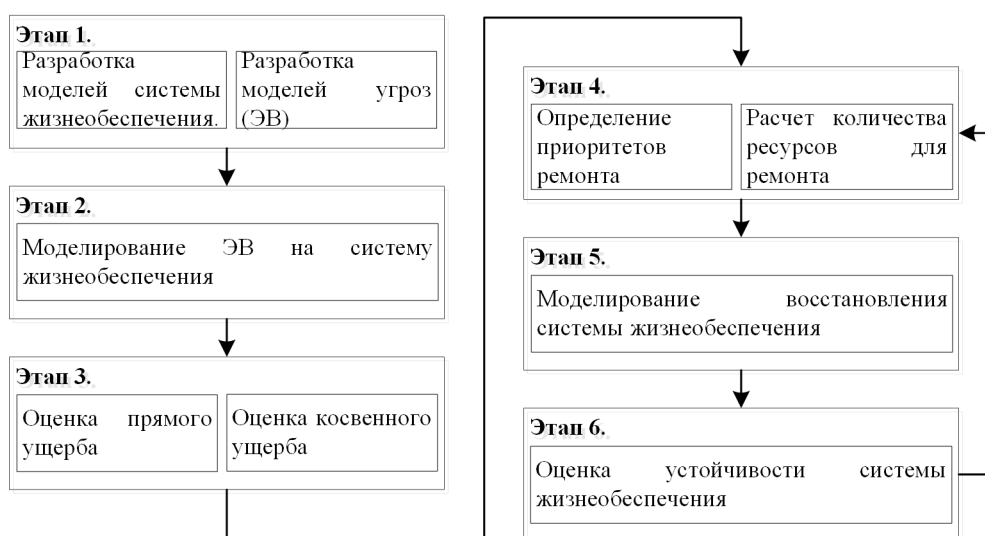


Рис. 7. Алгоритм моделирования устойчивости систем жизнеобеспечения

На этапе 1 осуществляется разработка математической модели системы жизнеобеспечения. Первая группа моделей этого шага включает создание графа системы жизнеобеспечения, моделей физических потоков, отображение графа на топооснове.

Вторая группа содержит модели ЭВ для различных видов опасностей, таких как:

- сейсмическая, модель которой содержит карты интенсивности опасности, данные о характеристиках грунта (пиковых значений ускорения, скорости и смещения);
- затопления, модель которого включает карты глубины и скорости потока воды
- воздействия ураганного характера, модель которого включает карты скорости ветра и др.

На этапе 2 разрабатываются сценарии ЭВ на систему жизнеобеспечения (в рамках сценариев задаются числовые значения параметров угроз, такие как интенсивность, сколько ветра и др.) и проводится моделирование таких воздействий.

На этапе 3 по результатам моделирования определяется общий ущерб от ЭВ., который включает прямой и косвенный ущерб. При оценке прямого ущерба определяется список компонентов системы, получивших повреждения. Для определения повреждений используются модели хрупкости типовых компонентов системы. Учет неопределенностей при оценке физических повреждений компонентов системы жизнеобеспечения происходит с использованием

метода Монте-Карло. Оценка косвенного ущерба связана моделированием распространения каскадных эффектов в системе, состоящей из нескольких взаимозависимых инфраструктур.

На этапе 4 определяется стратегия восстановления. В процессе ее формирования назначаются приоритеты ремонта поврежденных компонентов системы с учетом выбранного критерия. Исходя из степени повреждения компонентов системы определяются времена их восстановления, распределяются ремонтные ресурсы (количество ремонтных бригад, оборудования и материалов). Для учета неопределенностей при оценке времени ремонта поврежденных компонентов используется метод Монте-Карло.

На этапе 5 выполняется моделирование восстановления в соответствии с определенной на предыдущем этапе стратегии.

По результатам моделирования на этапе 6 строится кривая производительности и выполняется оценка устойчивости системы с использованием выбранного показателя. В том случае, когда значение показателя устойчивости меньше заданного, осуществляется перераспределение ремонтных ресурсов или приоритетов (этап 4).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен систематический анализ публикаций по устойчивости инженерной инфраструктуры, который выявил возможности, проблемы, ограничения и будущие направления исследований систем жизнеобеспечения.

Анализ литературы показал, что многие исследования сконцентрированы на фазах устойчивости (поглощение, оценка последствий, восстановление, адаптация и т.д.) применительно к конкретным системам (электроэнергетика, водоснабжение, связь и др.) и видам экстремальных воздействий.

Для оценки устойчивости таких систем применяются различные подходы (оптимизация, моделирование с использованием топологических, потоковых и др. моделей) и показатели. В литературе отмечается, что в настоящий момент не существует согласованных показателей устойчивости, по которым возможно проводить обоснованное сравнение различных систем.

Устойчивость системы жизнеобеспечения связана с внешними угрозами, направленными на уязвимость таких систем. Для моделирования воздействий угроз на уязвимость применяются вероятностные модели и кривые хрупкости компонентов системы. Для поиска уязвимостей применяются топологические и потоковые модели. Топологические модели отличаются простотой и высокой скоростью расчета, однако они дают качественную оценку, так как не учитывают физических особенностей инженерных инфраструктур. Результаты расчета, полученные с использованием потоковых моделей, являются более точными, так предоставляют количественную оценку изменения потоков в сети при ЭВ. Однако такие вычисления занимают существенно большее время и требуют значительно большего объема исходных данных о системе.

Кривые разрушения и восстановления, основанные на статистических данных, полученных из аналогичных исторических событий, удобно использовать для ускоренного (предварительного) планирования в условиях ЭВ.

По результатам проведенного анализа предложена последовательность мероприятий по исследованию устойчивости систем жизнеобеспечения в условиях ЭВ, которая может быть использована при имитационном моделировании.

Данная работа углубляет понимание последствий экстремальных воздействий на системы жизнеобеспечения, что должно повысить эффективность планирования восстановления и устойчивость к такого рода событиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенюк Г.Г., Лубков Н.В., Никишов С.М. *Информационные аспекты управления муниципальным хо-зяйством*. М.: ЛЕНАНД, 2011.
2. Reid R.L. How to make infrastructure more resilient against climate change. *American society of civil engineer*, 2022. <https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/civil-engineering-magazine/issues/magazine-issue/article/2022/01/how-to-make-infrastructure-more-resilient-against-climate-change> (дата последнего обращения: 20.05.2025).
3. Mottahedi A., Sereshki F., Ataei M., Nouri A., Barabadi A. The Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 6, p. 1571.
4. *ГОСТ Р 27.102-2021*. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. Издание официальное. М.: Стандартиформ, 2021.
5. Гребенюк Г.Г., Лубков Н.В. Надежный подход к анализу устойчивости инженерной инфраструктуры. *УБС*, 2022, № 99, стр. 157–181.
6. Sathurshan M., Saja A., Thamboo J., Haragucht M., Navaratnam S. Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review of Measurement Frameworks. *Infrastructures*, 2022, vol. 7, no. 67, pp. 1–26.
7. Almoghathawi Y., González A.D., Barker K. Exploring Recovery Strategies for Optimal Interdependent Infrastructure Network Resilience. *Networks and Spatial Economics*, 2021, vol. 21, pp. 229–260.
8. Afrin T., Yodo N. Resilience-Based Recovery Assessments of Networked Infrastructure Systems under Localized Attacks. *Infrastructures*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 11–28.
9. Panteli M., Mancarella P., Trakas D. N., Kyriakides E., Hatziargyriou N. D. Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2017, vol. 32, no. 6, pp. 4732–4742.
10. Ouyang M., Duenas-Osorio L., Min X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems. *Struct. Saf.*, 2012, vol. 7, no. 67, pp. 1–26.
11. Fang Y., Sansavini G. Emergence of antifragility by optimum postdisruption restoration planning of infrastructure networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 2017, vol. 23, no. 4, p. 04017024.
12. Hu F., Yeung C.H., Yang S., Wang W., Zeng A. Recovery of infrastructure networks after localised attacks. *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, no. 1, p. 24522.
13. Mao Q., Liu Y. Post-Disaster Performance and Restoration Sequences of Interdependent Critical Infrastructure Systems Considering Various Socioeconomic Impacts. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 15, p. 6609.
14. Ryan R., Wortley L. Evaluations of post-disaster recovery: A review of practice material. *Evidence Base*, 2016, vol. 4, pp. 1–33.
15. Johansson J., Hassel H. An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis. *Reliab. Eng. Syst. Safe.*, 2010, vol. 95, no. 12, pp. 1335–1344.
16. Galvan G., Agarwal J. Assessing the Vulnerability of Infrastructure Networks based on distribution measures. *Reliab. Eng. Syst. Safe.*, 2020, vol. 196, no. 4, p. 106743.
17. Poulin C. Kane M. B. Infrastructure resilience curves: Performance measures and summary metrics. *Reliab. Eng. Syst. Safe.*, 2021, vol. 216, p. 107926.
18. Arghandeh R., Meier A., Mehrmanesh L., Mili L. On the definition of cyber-physical resilience in power systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2016, vol. 58, pp. 1060–1069.
19. Baag C.E., Chang S.J., Jo N.D., Shin J.S. Evaluation of seismic hazard in the southern part of Korea. *Proc. 2nd International Symposium on Seismic Hazards and Ground Motion in the Region of Moderate Seismicity*. Seoul, 1998, pp. 31–50.

20. O'Rourke M., Ayala G. Pipeline damage due to wave propagation. *Journal of geotechnical engineering*, 1993, vol. 119, no. 9, pp. 1490–1498.
21. Choi J., Yoo D.G., Kang D. Post-Earthquake Restoration Simulation Model for Water Supply Networks. *Sustainability*, 2018, vol. 10, no. 10, p. 3618.
22. Park J., Nojima T., Reed D. Nisqually Earthquake Electric Utility Analysis. *Earthquake Spectra*, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 491–509.
23. Reed D.A. Electric utility distribution analysis for extreme winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, vol. 96, pp. 123–140.
24. Meng F., Fu G., Farmani R., Sweetapple C., Butler D. Topo-logical attributes of network resilience: A study in water distribution systems. *Water Research*, 2018, vol. 143, pp. 376–386.
25. Ek B., Verschneider C., Narayan D.A. Global efficiency of graphs. *AKCE International Journal of Graphs and Combinatorics*, 2015, vol. 12, pp. 1–13.
26. Pan S., Bathgate K., Han Z., Sun J., Zhang Z. Modeling Interdependent Infrastructure System Vulnerability with Imprecise Information Using Two Fuzzy Inference Systems. *Transportation Research Record*, 2024, vol. 2679, no. 2, pp. 1528–1540.
27. Goldbeck N., Angeloudis P., Ochieng W.Y. Resilience assessment for interdependent urban infrastructure systems using dynamic network flow models. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, vol. 188, pp. 62–79.
28. Alderson D.L., Brown G.G., Carlyle W.M. Operational Models of Infrastructure Resilience. *Risk Analysis*, 2015, vol. 35, no. 4, pp. 562–586.
29. Abedi A., Gaudard L., Romerio F. Power flow-based approaches to assess vulnerability, reliability, and contingency of the power systems: The benefits and limitations. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, vol. 201, p. 106961.
30. Gjorgiev B., Sansavini G. Identifying and assessing power system vulnerabilities to transmission asset outages via cascading failure analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 2022, vol. 217, p. 108085.
31. Noebels M., Preece R., Panteli M. AC Cascading Failure Model for Resilience Analysis in Power Networks. *IEEE Systems Journal*, 2022, vol. 16, pp. 374–385.
32. Ghasemi A., De Meer H. Robustness of Interdependent Power Grid and Communication Networks to Cascading Failures. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2023, vol. 10, no. 4, pp. 1919–1930.
33. Sharma N., Tabandeh A., Gardoni P. Resilience analysis: a mathematical formulation to model resilience of engineering systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2018, vol. 3, no. 2, pp. 49–67.
34. Karakoc D.B., Almoghathawi Y., Barker K., González A.D., Mohebbi S. Community resilience-driven restoration model for interdependent infrastructure networks. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, vol. 38, p. 101228.
35. Nurre S.G., Cavdaroglu B., Mitchell J.E., Sharkey T.C., Wallace W.A. Restoring infrastructure systems: An integrated network design and scheduling (INDS) problem. *Eur. J. Oper. Res.*, 2012, vol. 223, pp. 794–806.
36. Mao X., Lou X., Yuan C., Zhou J. Resilience-Based Restoration Model for Supply Chain Networks. *Mathematics*, 2020, vol. 8, no. 2, p. 163.
37. Xu M., Li G., Chen A. Resilience-driven post-disaster restoration of interdependent infrastructure systems under different decision-making environments. *Reliability Engineering and System Safety*, 2024, vol. 242, no. 2, p. 109599.
38. Ji A., He R., Chen W., Zhang L. Computational methodologies for critical infrastructure resilience modeling: A review. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, vol. 62, part B, p. 102663.

39. Kong J., Zhang C., Simonovi S.P. A Two-Stage Restoration Resource Allocation Model for Enhancing the Resilience of Interdependent Infrastructure Systems. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 19, p. 5143.
40. González A.D., Dueñas-Osorio L., Sánchez-Silva M., Medaglia A.L. The interdependent network design problem for optimal infrastructure system restoration. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2016, vol. 31, no. 5, pp. 334–350.
41. Fang Y., Sansavini G. Optimum post-disruption restoration under uncertainty for enhancing critical infrastructure resilience. *Struct. Saf.*, 2019, vol. 185, pp. 1–11.
42. Sanci E., Daskin M.S. Integrating location and network restoration decisions in relief networks under uncertainty. *Eur. J. Oper. Res.*, 2019, vol. 279, pp. 335–350.
43. Ding T., Wang Z., Jia W., Chen B., Chen C., Shahidehpour M. Multiperiod Distribution System Restoration with Routing Repair Crews, Mobile Electric Vehicles, and Soft-Open-Point Networked Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, vol. 11, no. 6, pp. 4795–4808.
44. Cagnan Z., Davidson R. Post-earthquake restoration modeling of electric power systems *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 2004. https://www.academia.edu/download/78887475/13_109.pdf (дата последнего обращения: 06.06.2025).
45. Zorn C., Shamseldin A.Y. Post-disaster infrastructure restoration: A comparison of events for future planning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2015, vol. 13, pp. 158–166.
46. Wang J., Liao F., Wu J., Sun H., Wang W., Gao Z. Measurement of functional resilience of transport network: The case of the Beijing subway network. *Transport Policy*, 2023, vol. 140, no. 4, pp. 54–67.
47. Lee S.; Kim J.H. Quantitative Measure of Sustainability for Water Distribution Systems: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 2020, vol. 12, p. 10093.
48. Gu Y., Fu X., Liu Z., Xu X., Chen A. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, vol. 133, p. 101809.
49. Bruneau M., Chang S. E., Eguchi R. T., Lee G. C., O'Rourke T. D., Reinhorn, A. M., Von Winterfeldt, D. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Struct. Saf.*, 2003, vol. 19, no. 4, pp. 733–752.
50. Song Y., Li R. System resilience distribution identification and analysis based on performance processes after disruptions. *PLoS One*, 2022, vol. 17, no. 11, p. e0276908.
51. Núñez-López J.M., Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J.M. Involving resilience in optimizing the water-energy-food nexus at macroscopic level. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 147, no. 67, pp. 259–273.
52. Wells E.M., Boden M., Tseytlin I., Linkov I. Modeling critical infrastructure resilience under compounding threats: A systematic literature review. *Progress in disaster science*, 2022, vol. 15, p.100244.
53. Гребенюк Г.Г., Калянов Г.Н., Середа Л.А. Устойчивость функционирования ресурсоснабжающих предприятий. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2024, № 3, стр. 73–82.
54. Jovanovic A. S., Chakravarty S., Jelic M. Resilience and Situational Awareness in Critical Infrastructure Protection: An Indicator-Based Approach. *Issues on Risk Analysis for Critical Infrastructure Protection*, 2021. <https://www.intechopen.com/chapters/76951> (дата последнего обращения: 11.07.2025).
55. Barthelemy M. Spatial Networks. *Phys. Rep.*, 2011, vol. 499, no. 1-3, pp. 1–100.
56. Wen M., Chen Y., Yang Y., Kang R., Zhang Y. Resilience-based component importance measures. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2020, vol. 30, no. 11, pp. 4244–4254.
57. Iannacone L., Björnsson I., Thöns S., Honfi D. Multi-index method for visualizing robustness of structures. *IABSE Symposium*, 2025, Tokyo, pp. 421–428.
58. Sun X., Chen J., Zhao H., Zhang W., Zhang Y. Sequential Disaster Recovery Strategy for Resilient Distribution Network Based on Cyber-Physical Collaborative Optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, vol. 14, no. 2, pp. 1173–1187.

59. Liu X., Ferrario E., Zio E. Resilience analyzes framework for interconnected critical infrastructures. *ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems*, 2017, vol. 3, no. 2, part b, p. 021001.
60. Wu G., Li M., Li Z.S. Resilience-Based Optimal Recovery Strategy for Cyber-Physical Power Systems Considering Component Multistate Failures. *IEEE Transactions on Reliability*, 2021, vol. 70, no. 4, pp. 1510—1524.
61. Aydin N.Y.; Mays L.; Schmitt T. Sustainability assessment of urban water distribution systems. *Water Resour. Manag.*, 2014, vol. 28, pp. 4373—4384.
62. Cimellaro G.P., Tinebra A., Renschler C., Fragiadakis M. New resilience index for urban water distribution networks. *Journal of Structural Engineering*, 2016, vol. 142, no. 8, p. 4015014.
63. Lim S., Kim T. Song J. System-Reliability-based Disaster Resilience Analysis: Framework and Applications to Structural Systems. *Structural Safety*, 2022, vol. 96, p. 102202.
64. Burton H., Miles S. B., Kang H. Integrating Performance Based Engineering and Urban Simulation to Model Post-Earthquake Housing Recovery. *Earthquake Spectra*, 2018, vol. 34, no. 4, pp. 1772—1785.
65. Chu-Ketterer L.-J., Burkhardt J.B., Klise K., Haxton T. Water network tool for resilience. In *Embracing Analytics in the Drinking Water Industry*, Ed. J. Lee. London: IWA Publishing, 2022, pp. 295—324.
66. Klise K.A., Hart D., Moriarty D., Bynum M.L., Murray R., Burkhardt J., Haxton T. Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual, 2012, https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=337793 (дата последнего обращения: 10.08.2025).

Methods for Studying the Resilience of Lifeline Systems to Extreme Impacts

G. G. Grebenyuk, L. A. Sereda

A systematic analysis of publications on the resilience of engineering infrastructure, including lifeline systems, is conducted. The features of threat modeling are considered, as well as models and methods for identifying vulnerabilities of such systems under extreme impacts. General characteristics of the recovery process, models and methods for studying this process are presented. Indicators for assessing the resilience of lifeline systems with corresponding mathematical models and methods are considered. It is noted that currently there are no agreed-upon resilience indicators by which it is possible to conduct a reasonable comparison of systems. Many publications focus on the resilience phases (preparation, absorption, restoration and adaptation) in relation to specific systems (electric power, water supply, communications, etc.). Based on the results of the literature analysis, a sequence of procedures for studying the resilience of lifeline systems is proposed, which can be used in simulation.

KEYWORDS: lifeline system, threats, vulnerabilities, recovery, resilience.