

НАДЕЖНОСТНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ УСТОЙЧИВОСТИ ИНЖЕНЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Гребенюк Г. Г.¹, Лубков Н. В.²
(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Вопросы безопасности и устойчивости критической инфраструктуры представляют особую важность для жизнедеятельности современного общества. Это вызвано большим количеством угроз внутренней и внешней природы, которым подвержена критическая инфраструктура и ее важнейшая составляющая – инженерная. Многообразие инженерных систем, входящих в критическую инфраструктуру, их особенности и взаимная зависимость привели к появлению различных определений понятия устойчивости инженерной инфраструктуры, разработке различных математических моделей для их исследования. На основе оценки существующих моделей и концепций показано, что анализ устойчивости инженерной инфраструктуры может быть выполнен в рамках методологии анализа надежности с привлечением данных о характеристиках дестабилизирующих факторов, их интенсивности и географической зоны действия. Эти факторы влияют на частоту отказов обслуживания, уязвимость и устойчивость системы. Показана важность решения прямой задачи – оценки устойчивости инженерной инфраструктуры и обратной задачи – поиска критических сечений, изолирующих потребителей от источников ресурсов и энергии. Для решения обратной задачи используется топологическая модель системы и метод вероятностного моделирования при поиске сечений. Полученные результаты имеют методологическую и практическую составляющие, важные для повышения безопасности инфраструктуры на этапах проектирования и эксплуатации систем.

Ключевые слова: инженерная инфраструктура, дестабилизирующие факторы, уязвимость, надежность, устойчивость.

1. Введение

Инженерная инфраструктура (ИИ) играет важную роль в обеспечении жизнедеятельности современного общества, предоставляя инженерно-ориентированные виды услуг населению (электро-, тепло-, газо-, водоснабжение и водоотведение, кондиционирование, связь и др.) [7], а также в промышленно-

¹ Георгий Григорьевич Гребенюк, д.т.н., г.н.с. (grebenuk@lab49.ru).

² Николай Васильевич Лубков, к.т.н., в.н.с. (lbkvv@mail.ru).

сти. Отдельно взятые системы специализированы для выработки (преобразования) определенного ресурса и поставки его потребителям, снабжая также смежные системы и получая от них ресурсы, необходимые для функционирования инженерной инфраструктуры в целом. Сложность отдельных систем и взаимосвязей между ними позволяют рассматривать ИИ как систему систем.

Инженерная инфраструктура, как взаимосвязанная совокупность инженерных систем, является территориально распределенным комплексом [8], в случае нарушения работоспособности которого возможны как экономические потери, так и возникновение аварийных ситуаций и проблем безопасности.

Процесс эксплуатации ИИ сопровождается воздействием на нее широкого спектра дестабилизирующих факторов (ДФ), могущих привести к деградации технического состояния оборудования и снижению уровня работоспособности систем.

В [8] проведен анализ факторов, воздействующих на систему и влияющих на свойства характеристики работоспособности. Дестабилизирующие факторы представлены двумя группами – внутренними и внешними ДФ.

Внутренний дестабилизирующий фактор системы – фактор, источник которого расположен внутри системы или ее элементов, – это отказы элементов, обусловленные их ненадежностью, и приводящие к различным последствиям, включая и опасные.

Внешние дестабилизирующие факторы [2] – это факторы природного или техногенного характера, приводящие к существенному превышению допустимых норм технических условий для нормального функционирования системы, а также деструктивные человеческие факторы. Кроме того, внешние ДФ оказывают негативное воздействие не «точечно», а в некоторой зоне «поражения». Вследствие этого внешние ДФ могут приводить к множественным отказам элементов системы, что чревато более тяжелыми последствиями, чем при одиночных «естественных» отказах, вплоть до полной потери работоспособности системы или ее разрушения.

Особенно это относится к природным ДФ, вызванным изменением климата. Если ранее при проектировании КИ предпо-

лагалось, что в целом климат статистически постоянен, то сейчас стационарность не является допустимым предположением [24]. А это означает, что экстремальные погодные условия, которые когда-то считались маловероятными, с большей вероятностью приводят к сбоям в инфраструктуре.

Для сохранения работоспособности ИИ при возникновении отказов в системах имеется структурное резервирование. Кроме того, часто вводится избыточность по установленной мощности (производительности) оборудования. Это дает возможность проводить реконфигурацию структуры систем для поддержания работоспособности ИИ на возможно более высоком уровне после отказов оборудования. Следует также заметить, что многие потребители ресурсов допускают без существенных последствий перерыв в их поставках, если этот перерыв не превышает определенной величины.

Устойчивость ИИ обеспечивается как проведением предупредительных мероприятий (плановых ремонтно-профилактических работ, структурным и временным резервированием), так и восстановлением оборудования ИИ после отказов по внутренним и внешним причинам. Причем для восстановления работоспособности ИИ, нарушенной действием внешних ДФ, как правило, требуется организация противоаварийных мероприятий, объем и план (стратегия) выполнения которых зависит от степени поражения, допустимого времени восстановления, наличия людских, финансовых и материальных ресурсов.

Проблема существует практически для всех сложных систем: экологической, социальной, экономической, финансовой и, как уже говорилось, инженерной. Но специфика каждой системы вносит свое понимание в проблемы устойчивости. Так, в экологии устойчивость рассматривается с точки зрения скорости реакции экологической системы на внешние или внутренние воздействия, которые вызывают нарушение ее текущего состояния; в инженерии эти проблемы связаны с повышением устойчивости, которая рассматривается как потребность общества в создании безопасной критической инфраструктуры [23]. Вследствие этого термин «устойчивость инфраструктуры» до сих пор не имеет единого определения, и авторы публикаций на

эту тему используют свое понимание в зависимости от особенностей проводимых ими исследований [25].

Как правило, под устойчивостью подразумевается способность объекта или системы вернуться в нормальное состояние после возникновения события, нарушающего его состояние [22]. Такое широкое определение применимо к разнообразным областям науки и техники. В зависимости от вида системы и ее специфики предложены различные определения и толкования понятия «устойчивость ИИ» [11–13, 18, 19]. Многие из них пересекаются с уже существующими понятиями, такими как надежность, отказоустойчивость, живучесть; другие рассматривают устойчивость ИИ как совокупность неотъемлемых свойств, таких как надежность, способность к адаптации, обеспеченность ресурсами, скорость реакции; в части работ акцент сделан на организационную устойчивость ИИ.

С учетом специфики инженерных систем, устойчивость функционирования ИИ определяем следующим образом: устойчивость функционирования – это способность системы обеспечивать установленные технико-экономические показатели эксплуатации в условиях воздействия дестабилизирующих факторов и допускать восстановление работоспособности системы за приемлемое время.

Таким образом, устойчивость функционирования ИИ характеризует способность системы сохранять работоспособность в условиях более широкого и разнородного спектра ДФ в отличие от нормативных условий, для которых задаются требования по надежности.

Следует заметить: чтобы система была устойчивой, она должна быть надежной. Тем не менее возможны ситуации [24], когда система может потерять устойчивость даже при отсутствии на нее физического воздействия и отказов, например, из-за болезни персонала (организационная неустойчивость). Но подобные аспекты проблемы не относятся к категории технических задач и должны обсуждаться особо.

Поэтому анализ устойчивости в целом может базироваться на методологической основе надежностного анализа – структурном и вероятностном анализе. Структурный анализ предпо-

лагает выявление условий работоспособности системы в зависимости от работоспособности ее элементов. Вероятностный анализ направлен на получение числовых оценок показателей работоспособности по результатам структурного анализа с учетом безотказности и ремонтпригодности элементов системы, наличия различного вида избыточности – структурного резервирования, энергетической (ресурсной) и временной избыточности, а также стратегий технического обслуживания и ремонта (восстановления).

Однако анализ устойчивости ИИ требует применения дополнительных моделей внешних ДФ, моделей стойкости [3] и уязвимости [4] элементов системы при воздействии ДФ. Использование моделей ДФ с учетом интенсивности (мощности) ДФ позволяет определить зону поражения, а с учетом топологии (географического местоположения элементов системы) – выявить набор элементов, оказавшихся в зоне поражения. Далее для каждого элемента из этого набора определяется состояние работоспособности в зависимости от его стойкости и уязвимости по данному дестабилизирующему фактору. Оценка последствий от воздействия внешних ДФ осуществляется при структурном анализе системы. Однако стратегии восстановления могут быть иными, учитывающими вид возникшей чрезвычайной ситуации.

Дестабилизирующие факторы имеют разную физическую природу, частоту возникновения, и их воздействие на систему соотносят с различными временными интервалами. По этим причинам целесообразно их раздельное рассмотрение и анализ, получение раздельных оценок устойчивости системы по отношению к заданному (установленному) перечню ДФ с последующей их сверткой в обобщенный показатель в случае необходимости (и возможности).

При анализе устойчивости инженерных систем также выделяются две традиционные задачи. Прямая задача заключается в получении оценок показателей устойчивости системы. Решение обратной задачи направлено на поиск критически важных наборов элементов – сечений инженерной сети, работоспособность которых необходима для устойчивого функционирования

системы. Знание таких наборов позволяет на этапе проектирования и строительства инженерных сетей выбрать вариант рационального территориального размещения оборудования, чтобы исключить возможность одновременного повреждения элементов из критически важных наборов при воздействии внешних ДФ.

Важность применения моделей ДФ для проверки инфраструктурных решений, принимаемых на этапе проектирования, обусловлена также тем, что недальновидные решения могут заблокировать развитие территории на десятилетия. Например, новая дорога может способствовать развитию территории, но и может привести к значительному ущербу в области, подверженной влиянию растущих рисков наводнений из-за изменения климата [17].

Для эксплуатируемых инженерных систем решение обратной задачи позволяет определить перечень элементов, для которых в первую очередь целесообразно реализовать защитные мероприятия для повышения их безотказности, стойкости и снижения уязвимости в условиях воздействия ДФ.

Актуальность задач обеспечения устойчивого функционирования больших систем очевидна и подтверждается большим числом публикаций. Применительно к ИИ в указанных выше работах рассматриваются процессы нарушения работоспособности ИИ при ДВ, вводятся понятия и показатели устойчивости, определяются свойства, которыми должны обладать ИИ для сохранения устойчивости, парирования ДВ и восстановления работоспособности. В тоже время отсутствуют предложения по разработке общих подходов и моделей для оценки и повышения устойчивости ИИ, выявления критических объектов, ответственных за работоспособность ИИ.

В статье предпринята попытка устранить данный пробел: дано описание методологического подхода к исследованию устойчивости функционирования инженерной инфраструктуры на основе моделей и методов, используемых при анализе надежности, предложены формализованное описание инженерных систем, модель внешних ДФ, решения задач анализа устой-

чивости инженерной инфраструктуры и поиска критических сечений.

В статье дано описание методологического подхода к исследованию устойчивости функционирования инженерной инфраструктуры на основе моделей и методов, используемых при анализе надежности, предложены формализованное описание инженерных систем, модель внешних ДФ, решения задач анализа устойчивости инженерной инфраструктуры и поиска критических сечений.

2. Формализованное описание инженерных систем

В инженерных системах, исходя из их предназначения, осуществляются преобразования ресурсов разного вида в конечный продукт и доставка его потребителям в виде услуги. Поэтому в состав инженерной системы входят объекты, которые относят к четырем основным группам:

- 1) источники ресурсов, к которым следует отнести и объекты системы, получающие ресурсы «извне»;
- 2) преобразователи ресурсов (функциональные объекты);
- 3) потребители ресурсов;
- 4) технологические связи, обеспечивающие целостность системы и неразрывность общего технологического процесса.

Потребитель одного вида ресурса может выступать в качестве источника другого вида ресурса. Например, ТЭЦ является потребителем газа и производителем тепловой и электрической энергии. Такого рода потребители, являющиеся пограничными элементами между системами различных ресурсов, будем называть терминальными.

Естественным представлением взаимосвязанных технологически инженерных систем, рассматриваемых как распределенный комплекс, является сетевая структура.

Формально сеть задается множеством вершин (узлов) и связей между ними – ребер (дуг):

- узловые элементы – объекты первых трех групп, которые будем рассматривать как сосредоточенные объекты;
- дуги – технологические связи.

Этот минимальный набор элементов необходим для описания реальных систем в виде графа. Дополнительная информация инкапсулируется в свойствах вершин и дуг. Учет дополнительной информации приводит к необходимости использования взвешенных графов.

Если технологическая связь не абсолютно надежна и подвержена нарушениям, то такая связь при оценке работоспособности системы должна учитываться наряду с функциональными основными объектами – элементами системы. По указанной причине в дальнейшем будет предполагаться, что узлы графа соответствуют тем компонентам систем, которые могут переходить в неисправное состояние, а дуги графа – абсолютные связи между узлами, не обладающие «функциональностью» и определяющие только топологию графа.

Инженерная инфраструктура относится к классу гетерогенных систем, в подсистемах которых реализуются независимые (например, технологические) процессы, а взаимодействие между ними происходит на уровне обмена ресурсами. Для определения гетерогенной системы можно использовать и более общее, упомянутое во введении, понятие «системы систем» $S = \{S_1, S_2, \dots, S_r\}$ как совокупность отдельных секторов (подсистем) S_i инженерной инфраструктуры.

Взаимодействие секторов в рамках системы систем выражается во взаимообмене «ресурсами», понимаемыми в самом широком смысле:

- материальные ресурсы;
- информационные ресурсы;
- организационно-управленческие ресурсы;
- социально-психологические ресурсы;

что в итоге определяет общий потенциал и эффективность системы.

Формализация S_i процесса взаимодействия секторов осуществляется при построении модели системы S . Каждый сектор представлен совокупностью объектов $O^i = \{O_1^i, O_2^i, \dots, O_{r_i}^i\}$, а модель сектора задается графом $G^i = (V^i, E^i)$, множество вершин

которого соответствует множеству объектов сектора, а множество ребер – связям между объектами.

Если перенумеровать вершины графа таким образом, что вершинам источникам (входным вершинам) будут присвоены начальные номера, начиная с единицы, а вершинам потребителям (выходным вершинам) – последние номера, то матрица связей графа для сектора будет иметь блочный вид, как это показано на рис. 1.

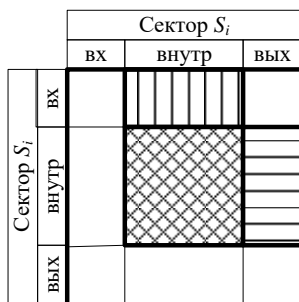


Рис. 1. Матрица связей графа для сектора

В блоке («вх», «внутр»), помеченном вертикальной штриховкой, задается распределение входных ресурсов между внутренними вершинами. Соответственно в блоке («внутр», «вых»), помеченном горизонтальной штриховкой, задается распределение выходного продукта. В блоке («внутр», «внутр»), помеченном двойной штриховкой, представлены технологические связи объектов.

Матричное представление системы систем показано на рис. 2, и эта интегрированная матрица также имеет блочный вид. Взаимодействие секторов S_i и S_j представлено блоками («вых S_i », «вх S_j »).

Каждый сектор может получать ресурсы от нескольких других секторов. Поставляемые ресурсы при этом могут быть альтернативными (взаимозаменяемыми и достаточными) или же обязательными для нормального функционирования сектора.

		Сектор S_j			...	Сектор S_r			Экспорт
		вх	внутр	вых		вх	внутр	вых	
Сектор S_j	Импорт								
	вх								
	внутр								
Сектор S_r	вх								
	внутр								
	вых								
...									
Сектор S_r	вх								
	внутр								
	вых								

Рис. 2. Матричное представление системы систем

3. Модели и характеристики дестабилизирующих факторов

Инженерные системы во время эксплуатации подвергаются различного рода воздействиям, которые могут привести к повреждению оборудования систем и потери работоспособности. Но в любом случае работоспособность системы будет определяться составом работоспособного оборудования.

Для целей анализа работоспособности и устойчивости с использованием математических моделей описание возмущающих воздействий необходимо представить в унифицированном виде.

Наиболее распространенными являются следующие внешние воздействия, имеющие, в основном, природный характер [15]: тайфуны/ураганы, наводнения и др.

Описание внешних воздействий должно включать в себя следующие характеристики:

- наименование воздействия;

- частота (вероятность) возникновения;
- интенсивность («мощность») воздействия;
- продолжительность воздействия;
- пространственная распространенность (зона воздействия);
- географические координаты.

Под частотой возникновения воздействия обычно понимается усредненное значение количества воздействий за определенный промежуток времени. В [15] в качестве вероятностной модели числа возникновения воздействий предлагается использовать биномиальное, пуассоновское распределение. Для описания интенсивности воздействия необходимо использовать непрерывные распределения – усеченное нормальное распределение (отсекаются отрицательные значения), гамма-распределение, распределение Гамбела.

Часть воздействий рассматриваются как исходные события, другие – как сопутствующие. Некоторые события являются взаимоисключающими или снижающими интенсивность других. Таким образом, между событиями прослеживается корреляционная связь. Характеристики внешних воздействий существенно зависят от региона и времени года.

Предлагается следующая процедура моделирования внешних ДФ. На множестве ДФ задается распределение вероятностей $P\{\text{ДФ}_i\} = p_i$, соответствующее частотам появления конкретных ДФ. На первом шаге проводится однократная выборка из этого распределения, т.е. определяется ДФ_k , которое реализовалось. На втором шаге проводится моделирование значения случайной интенсивности ζ воздействия ДФ_k , задаваемой распределением $f_k(\zeta)$. На третьем шаге для значения ζ_k интенсивности воздействия ДФ_k моделированием с учетом уязвимости объектов определяются состояния работоспособности тех объектов, которые оказались в зоне воздействия ДФ_k .

Характеристикой уязвимости является вероятность поражения объекта $F_p(\zeta)$ при заданной интенсивности ДФ, вид графика которой показан на рис. 3. Величина $(1 - F_p(\zeta))$ может рассматриваться как функция стойкости объекта (одноэлементной системы) к воздействию ДФ. В зоне стойкости [3] при значении

ях интенсивности воздействия $\zeta < \zeta_c$ гарантированно сохраняется работоспособность объекта. При $\zeta > \zeta_n$ в зоне поражения объект гарантированно теряет работоспособность (возможно и разрушается). В зоне уязвимости $\zeta_c \leq \zeta \leq \zeta_n$ вероятность потери работоспособности равна $F_\rho(\zeta)$. Если $\zeta_c = \zeta_n$, зона уязвимости отсутствует и функция уязвимости $F_\rho(\zeta)$ будет ступенчатой.

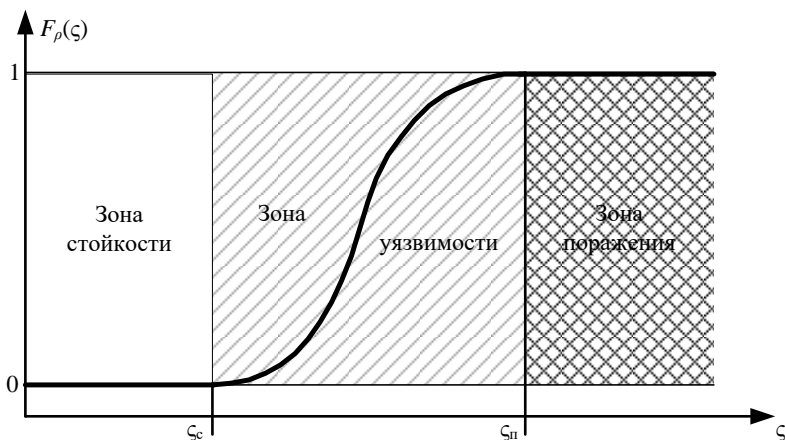


Рис. 3. Функция уязвимости объекта

Внутренние воздействия на систему порождают два противоположных процесса – процесс деградации работоспособности и технического состояния, обусловленный отказами и износом оборудования, и процесс восстановления работоспособности и технического состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов (замен) оборудования после отказа или по регламенту при исчерпании ресурса.

Надежность оборудования, согласно [6], характеризуется свойствами безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости.

Для целей анализа устойчивости наиболее важными являются первые три свойства.

В основе определения показателей безотказности и долговечности лежит понятие «наработка», которая определяется как

«продолжительность или объем работы объекта». Ремонтпригодность объекта характеризуется временем восстановления работоспособности объекта после отказа.

Универсальными характеристиками свойств надежности являются функции распределения: наработки до отказа (для свойства безотказности), наработки до предельного состояния (для свойства долговечности), времени восстановления (для свойства ремонтпригодности).

По этой причине все показатели отдельных свойств надежности оказываются эквивалентными, а использование отдельных из них определяется иными соображениями. Исключение составляют комплексные показатели надежности, учитывающие совокупность свойств надежности – обычно безотказность и ремонтпригодность, к которым относятся показателями готовности.

В теории надежности для описания наработки как случайной величины наиболее широко используются следующие распределения [6]: экспоненциальное, Вейбулла – Гнеденко, гамма-распределение, логнормальное.

Функция распределения $F(t)$ является интегральной характеристикой, и ее график слабо отражает особенности распределения. Более наглядным является график плотности распределения $f(t)$ наработки до отказа, на котором уже уверенно можно выделить интервалы наработок, в которых отказы наиболее вероятны. Но наибольшую наглядность и важность в теории надежности имеет условная плотность распределения наработки до отказа при условии, что отказ к данному моменту времени не наступил, – это интенсивность отказа $\lambda(t)$:

$$(1) \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)},$$

где $P(t) = 1 - F(t)$ – вероятность безотказной работы объекта на интервале времени $(0, t)$.

Особый интерес для описания наработок объектов до отказа представляет распределение Вейбулла – Гнеденко, функция распределения для которого равна

$$(2) \quad F(t) = 1 - e^{-\theta t^\beta},$$

где θ – параметр масштаба, β – параметр формы.

Интенсивность отказа равна

$$(3) \quad \lambda(t) = \theta\beta t^{\beta-1}.$$

В зависимости от значения параметра формы β можно получить сразу три возможных варианта распределений:

1) $\beta < 1$ – интенсивность отказов есть убывающая функция (молодеющее распределение);

2) $\beta = 1$ – интенсивность отказов постоянна (экспоненциальное распределение – нестареющее);

3) стареющие распределения:

– $1 < \beta < 2$ – интенсивность отказов, возрастающая функция, выпукла вверх;

– $\beta = 2$ – интенсивность отказов, линейно возрастающая функция;

– $\beta > 2$ – интенсивность отказов, возрастающая функция, выпукла вниз.

Таким образом, распределение Вейбулла – Гнеденко может быть использовано для аппроксимации эмпирических распределений различного типа.

Подводя итоги рассмотрения моделей и характеристик возмущающих воздействий, можно сделать вывод, что распределение Вейбулла – Гнеденко может быть использовано в качестве модели для описания непрерывных характеристик ДФ.

Для обработки статистических данных по ДФ, особенно при ограниченном их объеме, рекомендуется использовать графоаналитические методы [5, 10, 16].

4. Прямая задача анализа устойчивости

Анализ устойчивости системы направлен на оценку влияния ДФ на работоспособность системы через ухудшение показателей работоспособности ее элементов, а общий показатель устойчивости системы определяется на основе сопоставления результата функционирования системы в условиях воздействия ДФ с нормативным уровнем.

Понятие работоспособности является основополагающим в теории надежности и также применимо к оценке устойчивости ИИ. Поэтому методологические подходы анализа надежности полностью могут быть перенесены на область анализа устойчивости систем в части оценки влияния внутренних ДФ с необходимыми расширениями для учета внешних ДФ. Тогда решение прямой задачи анализа устойчивости систем должно включать три этапа:

1) построение функции работоспособности системы как функции состояний работоспособности ее элементов независимо от вида ДФ;

2) моделирование процесса возникновения отказов элементов. Здесь имеются различия при моделировании внутренних и внешних ДФ;

3) оценка показателей устойчивости. Принципиальных отличий в подходах к расчету показателей устойчивости систем и надежности нет, однако, учитывая широкий спектр разнородных внешних ДФ, необходимо сделать акцент и на частных показателях устойчивости к конкретным видам ДФ.

Модель работоспособности системы устанавливает соответствие между состояниями работоспособности элементов системы и работоспособностью системы. Располагаемые возможности ИИ в зависимости от состояния элементов могут меняться в диапазоне от номинального уровня до нуля. Учитывая тот факт, что для элементов предполагается только два состояния работоспособности – работоспособное и неработоспособное, то для описания состояний работоспособности элементов используется двоичная переменная. Соответственно, модель работоспособности системы может быть представлена дискретной функцией вида

$$(4) \quad \Phi(x(t)) = \sum_k \Phi_k L_k(x_1(t), \dots, x_n(t)),$$

где $L_k(x_1(t), \dots, x_n(t)) = 1$ только если в состоянии $x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$ обеспечивается уровень функционирования Φ_k ;

$L_k(x_1(t), \dots, x_n(t))$ является функцией алгебры логики (ФАЛ) – индикатором k -го уровня работоспособности;

$x_i(t)$ – логические переменные, характеризующие изменения работоспособности элементов системы:

$x_i(t) = 1$, если i -й элемент системы работоспособен в момент времени t ;

$x_i(t) = 0$, если i -й элемент системы неработоспособен в момент времени t .

Преимущества при использовании ФАЛ особенно проявляются при анализе систем с сетевой структурой, поскольку имеются регулярные методы построения ФАЛ и существуют методы расчета надежностных показателей, например, логико-вероятностные методы (ЛВМ) [14], для реализации которых разработаны эффективные вычислительные алгоритмы.

Построение функции работоспособности $f(x)$ систем с сетевой структурой выполняется в несколько этапов:

- выделяется входная $e_{\text{вх}}$ и выходная $e_{\text{вых}}$ вершины графа;
- формулируется критерий работоспособности в следующем виде: система работоспособна, если существует путь из входной вершины в выходную вершину – путь успешного функционирования;

- определяется множество путей успешного функционирования.

В зависимости от способа нахождения пути успешного функционирования могут содержать «избыточные» элементы, удаление которых из пути не нарушает работоспособность системы. Поэтому необходимо использовать минимальные пути [1], содержащие только необходимые для функционирования элементы, так что удаление любого элемента пути приводит к его нарушению.

Каждому минимальному пути $МП_i$ ставится в соответствие конъюнкция $K_i = x_{i1}x_{i2} \dots x_{in}$ (n – количество элементов или длина пути) логических переменных, ассоциированных с каждым элементом e , входящим в путь.

Дизъюнкция конъюнкций дает логическую функцию работоспособности системы:

$$(5) \quad f_p(x) = \bigcup_{i=1}^n K_i,$$

где n – число путей.

Выражение (3) определяет задание $f_p(x)$ в так называемой дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ).

Система будет работоспособна при условии, если существует хотя бы один работоспособный путь.

Аналогично функцию работоспособности системы можно записать в конъюнктивной форме, используя сечения (сети). Как и в случае с путями, сечение может содержать «избыточные» элементы. Сечение называют минимальным, если восстановление работоспособности хотя бы одного любого элемента переводит систему в работоспособное состояние [1].

Каждому минимальному сечению C_i соответствует дизъюнкция логических переменных $D_i = x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{im}$ (m – количество элементов, или мощность сечения), ассоциированных с каждым элементом e , входящим в сечение.

Конъюнкция дизъюнкций дает логическую функцию работоспособности системы:

$$(6) \quad f_c(x) = \bigcap_{i=1}^m D_i,$$

где m – число сечений.

Выражение (6) определяет задание $f_c(x)$ в так называемой конъюнктивной нормальной форме (КНФ).

Для систем большой размерности количество путей и сечений может быть очень большим. В подобных случаях вынуждены ограничиться некоторым разумным их числом ($\tilde{n} < m$, $\tilde{m} < m$) для получения приближенного результата.

Тогда, исходя из формул (3), (4), можно записать оценки

$$(7) \quad \tilde{f}_c(x) \geq f(x) \geq \tilde{f}_p(x).$$

Учитывая, что функции $f(x)$ – двоичные, то возможные сочетания оценок можно представить в таблице 1.

Таблица 1. Оценки функции работоспособности

№\Функция	$\tilde{f}_c(x)$	$\tilde{f}_p(x)$	$f(x)$
1.	0	0	0
2.	1	0	?
3.	0	1	не удовлетворяет (7)
4.	1	1	1

В случае 2 сочетания оценок функции $f(x)$ результат не определен и необходимы дополнительные вычисления для получения путей в сети для заданного вектора состояния $x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$.

Для этого необходимо из структуры сети удалить все те элементы e_i , которым в векторе $x(t)$ соответствуют нулевые значения координат $x_i(t)$. При наличии хотя бы одного пути $f(x) = 1$.

При построении функции работоспособности эффективным может быть алгоритм, в основу которого положено умножение строки матрицы связей на матрицу связей [9].

Моделирование отказов в результате внутренних ДФ является предметом рассмотрения в теории надежности и особенностей не имеет. Сложность моделей ДФ и невозможность их полностью аналитического описания, необходимость учета старения оборудования ИС как систем длительного действия, а также стратегий технического обслуживания и восстановления изначально предполагает при анализе устойчивости ИИ ориентацию на метод вероятностного (статистического) моделирования. Построение траектории изменения работоспособности осуществляется пошагово – изменение работоспособности происходит в моменты возникновения событий отказа элементов, восстановления работоспособности элементов. Моделирование осуществляется на заданном промежутке времени, или до наступления некоторого «финального» состояния. Уровень работоспособности системы для смоделированного набора состояний работоспособности элементов определяется вычислениями по формулам вида (4). Для каждой траектории проверяется выполнимость критериев неустойчивости, которые, исходя из определения понятия «устойчивость», можно сформулировать в следующей общей форме:

– снижение уровня работоспособности ниже критического уровня на время, превышающее допустимое;

– снижение интегрального выходного эффекта на заданном интервале времени ниже допустимого уровня.

Критериям такого вида будет соответствовать показатель «вероятность (не)устойчивости».

Полезной также является оценка общего показателя сохранения эффективности как отношения выходного эффекта функционирования системы в условиях ДФ к номинальному уровню и сопоставление его с нормативным значением.

Наряду с перечисленными показателями, целесообразно иметь оценки частных показателей устойчивости по отношению к конкретному виду ДФ.

5. Обратная задача анализа устойчивости

Для ИИ как территориально-распределенных систем, подвергающихся воздействию внешних ДФ, особую важность, наряду с выбором структурного построения системы и обеспечения стойкости оборудования к ДФ, приобретает рациональное размещение оборудования на местности. Анализ внешних ДФ позволяет провести зонирование области возможного размещения оборудования ИИ с учетом угроз ДФ.

Как сказано во введении, в обратной задаче определяются элементы, критически важные для работоспособности ИИ. Поиск таких объектов проводится на основе структурного анализа сетевой структуры ИИ.

Критериями для отбора объектов являются значения показателей центральности узлов (важности), такие как степень вершины графа, число путей, проходящих через вершину и связывающих любую пару вершин графа (центральность по промежуточности), и многие другие. Важным показателем эффективности сети поставки ресурса от источника к данному узлу является минимальная длина пути к этому узлу.

Перечисленные критерии позволяют методом перебора выделить отдельные объекты и упорядочить их по значению выбранной характеристики. Однако в резервированных системах с несколькими допустимыми уровнями работоспособности к ощутимым последствиям приводят, как правило, сочетания отказов. Как следует из предыдущего раздела, минимальные сечения относятся к таким сочетаниям.

Поиск минимальных сечений для практически интересных случаев представляет собой трудоемкую процедуру в силу

сложности самих алгоритмов поиска и значительного числа сечений [20]. Поэтому на практике вынуждены ограничиваться анализом части наиболее «представительных» сечений. Представительность сечения понимается в смысле удовлетворения обобщенному критерию важности – комплексной характеристике узла (оборудования), учитывающей, возможно, наряду с указанной выше степенью и центральностью узла, также:

- стойкость/уязвимость оборудования;
- характеристики внешних ДФ;
- характеристики надежности оборудования;
- стоимость оборудования.

В рамках надежностного подхода к анализу устойчивости ИИ предлагается эффективный алгоритм построения множества представительных сечений [21], в основе которого лежит процедура вероятностного моделирования событий, вероятности p_i которых пропорциональны соответствующим значениям характеристики важности:

$$(8) \quad p_i = \frac{r_i}{\sum_{k=1}^n r_k},$$

где n – количество вершин графа, входящих во все пути между выделенными множествами источников ресурсов и множеством получателей ресурса; r_i – показатель предпочтительности для i -й вершины; p_i – вероятность выбора i -й вершины в сечение при моделировании.

Алгоритм моделирования сечения включает следующие этапы:

- 0) формирование множества объектов, входящих в пути;
- 1) построение распределения вида (8);
- 2) моделирование дискретной случайной величины ζ , подчиняющейся распределению вида (8);
- 3) если $\zeta = k$, то вершина s_k включается в сечение;
- 4) исключение из исходного (на данном шаге моделирования) множества путей всех тех путей, в которые входит вершина s_k ; если полученное множество путей пусто, то процесс моделирования сечения завершен, в противном случае осуществляется возврат к п.0 и процесс продолжится по описанной схеме.

Количество смоделированных сечений должно обеспечить статистическую устойчивость результатов; исходя из общих соображений, можно говорить о количестве сечений не менее 20.

Выбранные сечения определяют комбинации отказов, способных вызвать серьезные негативные последствия. Поэтому необходимо оценить вероятность возникновения таких ситуаций и сопутствующие им риски. По результатам анализа рисков уже принимаются, в случае необходимости, организационно-технические решения по повышению устойчивости функционирования ИИ.

6. Заключение

Инженерная инфраструктура относится к классу территориально распределенных систем, что предопределяет ее подверженность воздействию внешних по отношению к системе дестабилизирующих факторов природного или техногенного характера. Возникающие в результате таких воздействий отказы оборудования, так же как и отказы, обусловленные ненадежностью оборудования (внутренние дестабилизирующие факторы), приводят к снижению работоспособности инженерных систем и недопоставкам ресурсов потребителям. Такие явления квалифицируются как события нарушения устойчивости функционирования. Анализ устойчивости заключается в оценке влияния отказов на работоспособность системы и, тем самым, на обеспеченность потребителей ресурсами с учетом возможности восстановления работоспособности системы до требуемого уровня. В такой постановке задачи для исследования устойчивости функционирования инженерной инфраструктуры целесообразно опираться на методологию и использовать модели надежностного анализа, дополнив их моделями внешних дестабилизирующих факторов. Предлагаемые модели устанавливают зависимость вероятности повреждения (отказа) оборудования от интенсивности воздействия дестабилизирующих факторов и уязвимости (или стойкости) оборудования к таким воздействиям.

Рассмотрены две задачи исследования устойчивости. Решением прямой задачи являются оценки показателей устойчиво-

сти. Постановка обратной задачи включает нахождение критически важных комбинаций отказов оборудования (сечений), приводящих к потере работоспособности системы. Анализ таких комбинаций с учетом территориального размещения оборудования позволяет определить меры по защите оборудования или варианты его передислокации для минимизации последствий отказов по общей причине в результате воздействия внешних дестабилизирующих факторов.

Литература

1. БАРЛОУ Р., ПРОШАН Ф. *Математическая теория надежности*. – М.: Советское радио, 1969. – 488 с.
2. ГОСТ 26883-86 *Внешние воздействующие факторы. Термины и определения*. – М.: Стандартинформ, 2008. – 11 с.
3. ГОСТ 30631-99 *Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации*. – М.: Стандартинформ, 1999. – 36 с.
4. ГОСТ Р 22.2.12-2020. *Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Повышение устойчивости функционирования организаций в чрезвычайных ситуациях. Основные положения*. – М.: Стандартинформ, 2020. – 28 с.
5. ГОСТ 1108-75. *Правила применения и построения вероятностных сетей*. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 40с.
6. ГНЕДЕНКО Б.В., БЕЛЯЕВ Ю.К., СОЛОВЬЕВ А.Д. *Математические методы в теории надежности*. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
7. ГРЕБЕНЮК Г.Г., ЛУБКОВ Н.В., НИКИШОВ С.М. *Информационные аспекты управления муниципальным хозяйством*. – М.: ЛЕНАНД, 2011. – 320 с.
8. ГРЕБЕНЮК Г.Г., ЛУБКОВ Н.В. *Методологические аспекты анализа работоспособности территориально распределенных комплексов // Материалы 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем»*. – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 584–586.

9. КРЫГИН А.А., ЛУБКОВ Н.В. *Алгоритмы структурного моделирования трубопроводных систем* // Материалы 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем». – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 593–596.
10. ЛУБКОВ Н.В. *Метод оценки параметров распределений наработок объектов до отказа с использованием нелинейной аппроксимации* // Автоматика и телемеханика. – 2012. – №8. – С. 130–143.
11. МАХУТОВ Н.А., РЕЗНИКОВ Д.О., ПЕТРОВ В.П. *Особенности обеспечения безопасности критических инфраструктур* // Безопасность в техносфере. – 2014. – №1. – С. 1–14.
12. МИХАЙЛОВ Р.Л., МАКАРЕНКО С.И. *Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов* // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – №4. – С. 69–79.
13. ОДОЕВСКИЙ С.М., ЛЕБЕДЕВ П.В. *Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой* // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – №1. – С. 152–187.
14. ПОЛЕНИН В.И., РЯБИНИН И.А., СВИРИН С.К., ГЛАДКОВА И.А. *Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных, организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства*. – СПб: СПб-региональное отделение РАЕН, 2011. – 416 с.
15. РУСИН И.Н. *Стихийные бедствия и возможности их прогноза: учебное пособие*. – СПб., изд. РГГМУ, 2003. – 140 с.
16. ХАН Г., ШАПИРО С. *Статистические модели в инженерных задачах*. – М.: Мир, 1969.
17. *A System-Wide Approach for Infrastructure Resilience: Technical Note* // Asian development bank. – 2021. – URL: <https://adb.org/publications/system-wide-approach-infrastructure-resilience> [дата обращения: 29.09.2022].
18. *Critical infrastructure resilience. Final report and recommendations* // National infrastructure advisory council. – 2009. – URL: <https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/niac>

critical-infrastructure-resilience-final-report-09-08-09-508.pdf
[дата обращения: 17.08.2022].

19. FISHER R.E., BASSETT G.W., BUEHNING W.A., COL-
LINS M.J., DICKINSON D.C. et al. *Constructing a Resilience In-
dex for the Enhanced Critical Infrastructure Protection Program* //
Argonne National Laboratory. – 2010. – URL:
[https://www.researchgate.net/publication/239883918_Constructing
_a_resilience_index_for_the_enhanced_critical_infrastructure_Prot
ection_Program](https://www.researchgate.net/publication/239883918_Constructing_a_resilience_index_for_the_enhanced_critical_infrastructure_Protection_Program)
20. GREBENYUK G., NIKISHOV S. *Blocking of Energy and Re-
source Supply of Target Objects in Network Infrastructure* //
Automation and Remote Control. – 2018. – Vol. 79, Iss. 3. –
P. 535–544.
21. GREBENYUK G., LUBKOV N., SEREDA L. *Search and Se-
lection of Blocking Cross-sections in the Analysis of Vulnerabil-
ity and Efficiency of Engineering Networks* // Proc. of the IEEE
3rd Int. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Au-
tomation and Energy Efficiency, Lipetsk). – 2021. – P. 335–339.
22. HOSSEINI S., BARER K., RAMIREZ-MARQUEZ J.E. *A Re-
view of Definitions and Measures of System Resilience. Relia-
bility* // Engineering & System Safety. – 2016. – Vol. 145. –
P. 47–61.
23. REHAK D., SENOVSKY P., HROMADA M., LOVECEK T. *Complex approach to assessing resilience of critical infrastruc-
ture elements* // Int. Journal of Critical Infrastructure Protec-
tion. – 2019. – Vol. 25. – P. 125–138.
24. REID R. *How to make infrastructure more resilient against
climate change* // American society of civil engineers. – 2022. –
URL: [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](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 обращения:
29.09.2022].
25. SATHURSHAN M., SAJA A., THAMBOO J., HARAGU-
CHI M., NAVARATNAM S. *Resilience of Critical Infrastructure
Systems: A Systematic Literature Review of Measurement
Frameworks* // Infrastructures. – 2022. – Vol. 7, Iss. 67. – P. 1–26.

RELIABILITY APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE STABILITY OF ENGINEERING INFRASTRUCTURE

Georgy Grebenuk, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, chief researcher (grebenuk@lab49.ru).

Nikolay Lubkov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand. Sc., senior researcher (lbknv@mail.ru).

Abstract: Issues of safety and sustainability of critical infrastructure are of particular importance for the life of the population of any state. This is caused by a large number of threats of internal and external nature, to which the critical infrastructure and its most important component - engineering are subject. The variety of engineering systems included in the critical infrastructure and their features and mutual dependence have led to the emergence of various definitions of the concept of sustainability of engineering infrastructure, the development of various mathematical models for their study. Based on the evaluation of existing models and concepts, it is shown that the analysis of the stability of engineering infrastructure can be performed within the framework of reliability analysis with the involvement of data on the characteristics of destructive factors, their intensity and geographical area of action. These factors affect the failure rate of equipment, vulnerability and stability of the system. The importance of solving the direct problem of assessing the stability of engineering infrastructure and the inverse problem of finding critical sections is shown. To solve the inverse problem, a topological model of the system and a method of probabilistic modeling are used in the search for cross sections. The proposed results have methodological and practical components that are important for improving infrastructure security at the stages of system design and operation.

Keywords: engineering infrastructure, destabilizing factors, vulnerability, reliability, sustainability.

УДК 620.9:502.174

ББК 78.34

DOI: 10.25728/ubs.2022.99.7

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.Г. Лебедевым.

Поступила в редакцию 13.09.2022.

Опубликована 30.09.2022.