

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ СЕТЕВЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ ИНФРАСТРУКТУР ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Гребенюк Г.Г., Никишов С.М., Серeda Л.А., Рошин А.А.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
grebenuk@lab49.ru, nikishov@lab49.ru, sereda@lab49.ru, rochinaa@mail.ru

Аннотация: Для решения задач безопасности и уязвимости инженерных систем зданий и сооружений рассматриваются модели и алгоритмы анализа совместной работы сетевых инженерных систем, представленных в виде графа, особенности их функциональных связей, методы поиска критических объектов, наиболее важных для функционирования каждого вида сетей и всей системы инженерного обеспечения, в целом.

Ключевые слова: безопасность, уязвимость, модель анализа ущерба, критически важные элементы сетей.

Введение

Объекты капитального строительства (ОКС) – офисные здания, спортивные сооружения, торговые центры, научно – производственные комплексы, гостиницы и жилые здания – наполнены инженерными сетями электро-, водо-, тепло-, газо- и других видов снабжения, обеспечивающими выполнение функционального предназначения этих объектов. Большое скопление людей на таких объектах и значительная стоимость активов определяют важную роль методов анализа совместной работы взаимосвязанных инженерных сетей и состояния технической безопасности. Эти методы должны соответствовать новому уровню технологий инженерных сетей для современных строений и сооружений, сложность и взаимовлияния которых значительно увеличились в последнее десятилетие за счет автоматизации и информатизации производственных процессов, процессов управления и обслуживания клиентов, внедрения энергосберегающих технологий и т.д.

Использование методов анализа взаимосвязанных инженерных сетей и технической безопасности особенно важно для стареющих инфраструктур, оборудование которых вырабатывает или превышает установленный срок службы. Из-за ограниченности средств на ремонты часто возникает задача выбора приоритетных объектов, отказ которых вызовет наихудшие последствия с учетом возможного каскадного эффекта, как внутри данной сети, так и при распространении на другие виды сетей. Для такого выбора эффективен метод сценарного моделирования взаимодействий и оценки ущерба с использованием входо-выходной модели, производной от экономической модели В. Леонтьева.

1 Виды инфраструктур объектов капитального строительства

В ОКС присутствуют следующие виды инфраструктур: кибернетическая, киберфизическая, физическая, географическая и логическая.

Киберинфраструктура возникает при передаче и обработке информации. Она оказывает существенное влияние на работу всех инженерных систем современных ОКС. Киберинфраструктура, основанная на информационно-коммуникационных технологиях (ИТ), включает проводные и беспроводные линии связи, маршрутизаторы, серверы и др. Физическая инфраструктура основана на физическом уровне взаимодействия различных систем (например, прекращение электроснабжения вызывает отключение электронасосов и сбой водоснабжения и т.д.) и состоит из соответствующих подсистем (водоснабжения, газоснабжения, теплоснабжения и т.д.).

Киберинфраструктура входит в состав киберфизической системы (CPS), к которой относятся системы диспетчерского контроля и управления, системы защиты электрических устройств, умные сети зданий, измерительные приборы и которая отличается развитыми связями между вычислительными и физическими элементами. В ней часто используется архитектура, присущая интернету вещей.

Географическая зависимость для ОКС может быть определена как пространственная зависимость и связана с влиянием друг на друга близкорасположенных объектов разных систем. Например, протечка трубы, расположенной на верхнем этаже, может вызвать короткое замыкание электрического устройства этажом ниже.

Логическая зависимость возникает в результате логического анализа измерений, событий и др. Например, такая зависимость прослеживается в управлении диспетчером инженерными системами на основании показаний приборов.

Для вышеперечисленных инфраструктур ОКС характерны сбои, вызванные отказами, ошибками или преднамеренными действиями (атаками). Широкую известность приобрели хакерские атаки на инфраструктуру ИТ. Им подвержены объекты дистанционного управления и мониторинга промышленности и торговли, умные сети зданий. Последние часто используют слабо защищенные стандарты сетей передачи данных типа X10.

Каждая физическая инженерная инфраструктура ОКС является системой, в которой имеются источники, сеть и потребители. Источниками являются вводы в здание или автономные источники, независимые от внешней сети.

2 Особенности анализа последствий отказа в инженерных инфраструктурах зданий и сооружений

Как правило, взаимодействие «плоских» сетевых инфраструктур представляют в виде набора расположенных друг над другом слоев, каждый из которых содержит топологию одной инфраструктуры, а связи между слоями определяют взаимодействие между компонентами разных

инфраструктур. Создание многослойной модели для зданий и сооружений существенно отличается от модели «плоских» сетевых инфраструктур для территории.

Первое отличие. Каждая инженерная система жилого или производственного строения является трехмерным пространственным комплексом и изображается в виде набора принципиальных схем или планов по этажам (на которых указывается расположение горизонтальных элементов сети и обозначаются связи между ними) и межэтажным связям в виде различных стояков.

Второе отличие. Многообразие видов инженерных систем и их поэтажное расположение для каждого отдельного здания. Это системы электроснабжения, кондиционирования серверных и офисных помещений, вентиляции, пожаротушения, водоснабжения, водостока и водоотведения, системы отопления и др., выполненные в двух и трехмерном виде.

Третье отличие. Территориально распределенные комплексы часто содержат несколько многоэтажных зданий и сооружений, причем часть инженерных коммуникаций проходит вне зданий по территории между ними. Поэтому при создании интегрированного представления возникает необходимость совмещения различных поэтажных планов (созданных различными разработчиками) и топографической основы территории.

Четвертое отличие. Пространственное влияние объектов связано не только с их близким расположением друг к другу в горизонтальной плоскости, но и с расположением объектов в вертикальной плоскости по этажам здания.

3 Особенности формирования функциональных связей между инфраструктурами

При распространении возмущения между разными инфраструктурами будем рассматривать функциональную взаимосвязанность сетей, которая возникает, когда результат выполнения функций одной из сетей зависит от исправности другой сети [1].

Для модели распространения возмущения в системе, рассматриваемой как «система систем», рассмотрим в каждой инженерной подсистеме три набора объектов: источники ресурса S1, S2, S3, S4, преобразователи T1, T2, T3, T4, T5 и коммуникации, потребители ресурса P1, P2, P3, P4. Примеры подсистем, отличающиеся структурой, приведены на рис. 1.

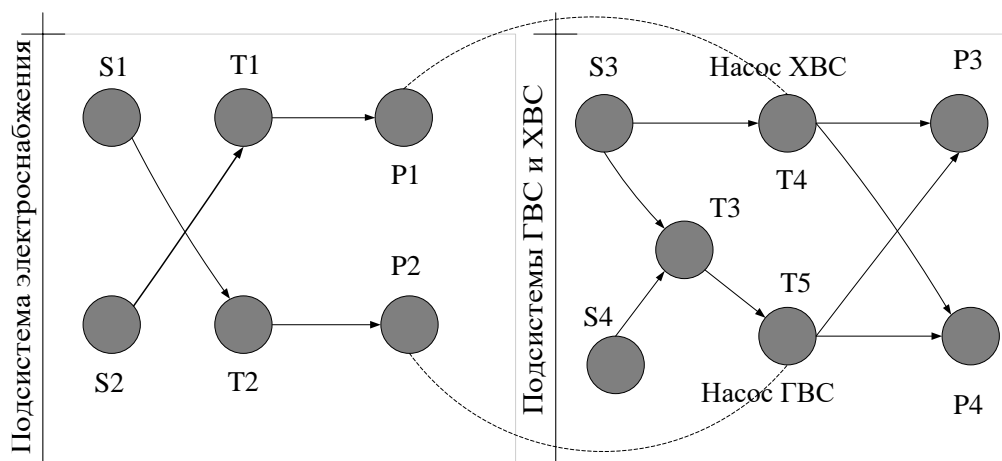


Рис. 1. Пример взаимодействия сетей электроснабжения, холодного водоснабжения и горячего водоснабжения

На рис. 1 в упрощенном виде показано функциональное взаимодействие подсистем электроснабжения с подсистемами горячего и холодного водоснабжения.

В системе электроснабжения источниками S1 и S2 являются трансформаторные подстанции, T1 и T2 – объекты электросети (например, автоматы), а P1 и P2 – потребители электроэнергии (электродвигатели насосов холодного и горячего водоснабжения). В системе холодного водоснабжения (ХВС) и горячего водоснабжения (ГВС) S3 – сетевая вода ХВС, S4 – горячая вода теплосети, T3 – бойлер горячего водоснабжения, T4 T5 – крыльчатки насосов холодного и горячего водоснабжения, P3 и P4 – потребители горячей и холодной воды.

Часть объектов на рис.1 одновременно принадлежит нескольким подсистемам.

Например, потребитель P1 подсистемы электроснабжения (электродвигатель насоса холодного водоснабжения) одновременно является приводом крыльчатки насоса T4 в подсистеме холодного

водоснабжения, потребитель Р2 (электродвигатель насоса горячего водоснабжения) одновременно является приводом крыльчатки насоса Т5 в подсистеме горячего водоснабжения

Другим примером является теплообменник Т3 получающий сетевую воду, который является потребителем для теплосети. Одновременно он выполняет функцию источника тепловой энергии для местных систем отопления и горячего водоснабжения.

4 Модель анализа ущерба

Анализ взаимосвязанных сетевых инженерных инфраструктур зданий и сооружений необходим для обеспечения техногенной безопасности и планирования ремонтов. Для этого необходима информация о критических объектах инфраструктур, наиболее важных для функционирования каждой инфраструктуры и всей системы обеспечения в целом.

Методом, показавшим свою эффективность для анализа взаимодействующих сетей, является метод сценарного моделирования с оценкой ущерба на основе входе-выходной модели, производной от экономической модели В. Леонтьева. Для инженерных систем технические коэффициенты матрицы Леонтьева, имеющие в экономической модели значения в диапазоне от 0 до 1, и определяющие взаимное влияние отраслей, принимают вид булевых переменных 0 или 1. Эти значения характеризуют наличие или отсутствие связи между узлами сети [2].

Метод сценарного моделирования на основе входе-выходной модели позволяет определить накопленную недееспособность системы после появления отказа. То есть, для каждого сценария эти модели определяют сокращение возможностей (накопление ущерба) на определенных, отдельных узлах сети.

Для оценки ущерба используется уравнение (1):

$$(1)$$

где q – вектор ущерба, c – вектор сценария или вектор внешних возмущений, A – матрица смежности.

Как сказано выше, модель анализа предполагает, что любая взаимозависимость изображается булевой переменной со значениями 0 или 1 в матрице смежности A . Если компонент k не имеет зависимости от компонента j , то $a_{kj} = a_{jk} = 0$.

Рассмотрим подходы к решению этой задачи на примере взаимодействия 3-х систем электро-, водоснабжения и ИТ, изображенных на рис 2.

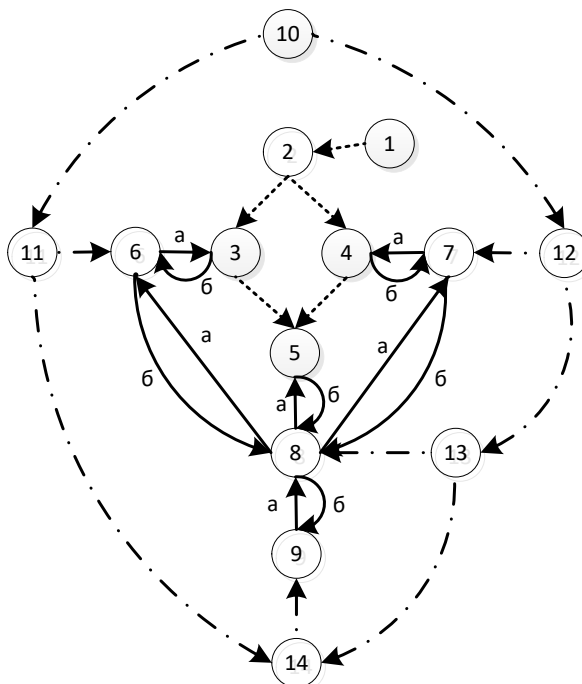


Рис.2. Взаимодействие сетей электроснабжения, водоснабжения и ИТ

На рис. 2 пунктиром изображена система водоснабжения, сплошными линиями сети ИТ, штрих - пунктирными линиями система электроснабжения, 1-бак водонапорный, 2-коллектор, 3, 4 насосы

с устройствами управления и измерения, 5-потребитель воды, 6, 7, 8-маршрутизаторы (коммутаторы), 9 –сервер обработки и хранения, 10 –электрический ввод, 11-14 автоматы щитов питания. Привод насосов на рисунке не показан (предполагается, что они запитаны электричеством от независимого источника).

Данные измерений через маршрутизаторы поступают на сервер 9, обрабатываются, и команды управления передаются на насосы 3 и 4.

Системе рис. 2 присущи следующие потоки:

- мощности между электрическими узлами;
- воды между узлами водоснабжения;
- информации между киберузлами;
- электрической энергии от электрических узлов к киберузлам;
- команд от киберузлов к насосам 3 и 4 (обозначены буквой «а»),
- данных от датчиков насосов 3 и 4 к киберузлам 6-9 (обозначены буквой «б»).

Особенностью схемы рис. 2 является бинаправленность команд и измерений, проходящих по одному каналу связи.

Модель ввода-вывода является полезным инструментом для определения последствий отказов в системе. Задавая для i -ой строки $c_i = 1$, можно получить ущерб q_j каждого узла системы $j=1, \dots, n$, где n – число узлов при отказе i -го узла. Таким образом, отказ i -го узла будет распространяться на другие зависящие от него узлы всех связанных инфраструктур и при наличии связей может вызвать дополнительный ущерб в исходной инфраструктуре.

Накопленный ущерб для сценария $c_i = 1$ получим по формуле (2):

$$(2)$$

Значения ущерба приведены в относительных единицах, рассчитанных по отношению к сумме максимальных ущербов по обоим направлениям для всех узлов.

Таблица 1. Накопленные ущербы для прямого и обратного направления сигналов в ИТ системе

№ узла	1	2	3	4	5	6	7
ущерб	0.08	0.067	0.026	0.026	0.013	0.04	0.04
	0.16	0.15	0.07	0.06	0.013	0.04	0.04
№ узла	8	9	10	11	12	13	14
ущерб	0.093	0.11	0.35	0.17	0.16	0.11	0.12
	0.026	0.013	0.187	0.08	0.09	0.04	0.026

На рис.3 показана гистограмма ущерба.

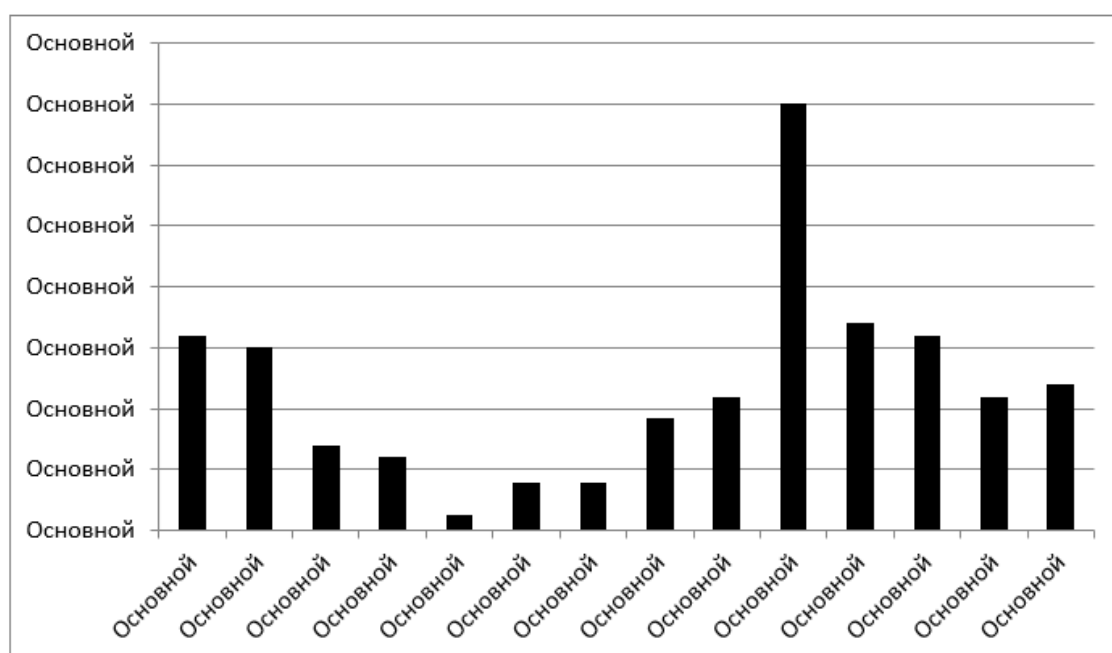


Рис. 3. Гистограмма ущерба

В таблице 1 представлены накопленные ущербы для всех сценариев отказов узлов при 2-х возможных направлениях информации в IT-сети. Ущерб, показанный на гистограмме, получен при выборе максимального ущерба среди ущербов, вычисленных для каждого из возможных направлений потоков информации в IT сети. Как видно из рис.3 наибольший ущерб причиняется системе при реализации сценария с отказом узла 10, который и является критически важным узлом схемы рис. 2.

5 Распространение последствий отказа по системе

После определения элементов, являющихся критически важными для работы системы необходимо проверить работу различных взаимосвязанных структур при появлении неработоспособности у таких элементов.

Анализ распространения последствий отказа по системе весьма важен для сложных взаимосвязанных инфраструктур. Он позволяет объяснить динамику распространения последствий повреждения по различным инфраструктурам и предпринять меры по их защите.

Распространение последствий отказа по каждой инфраструктуре можно выполнять по матрице смежности A , но тогда в соответствии с [3] для m -инфраструктур потребуется 2^m матриц.

Авторами использованы эффективные методы поиска на графах, которые определяют распространение последствий отказа внутри каждой инфраструктуры, и разработана программа – диспетчер, определяющая переходы через узлы сопряжения между инфраструктурами [4].

В этих методах использованы различные подходы к исследованию негативных последствий отказов для гетерогенных инфраструктур, такие как:

1. Метод перебора.

Такой подход к выявлению распространения негативных последствий отказов компонентов основан на переборе вариантов повреждений с моделированием на графе последствий повреждений. Отметим, что данный подход обеспечивает высокую достоверность в определении критических объектов.

При всей простоте реализации такие алгоритмы обладают очень большой вычислительной сложностью. При общем числе вершин графа N и числе исключаемых вершин K общее число разметок графа, которые необходимо провести, определяется биномиальным коэффициентом C_N^K . Это число очень быстро растет как при увеличении размерности сети (числа вершин в графе), так и при увеличении числа исключаемых вершин. Для определения работоспособности узлов реальной сети могут потребоваться значительные вычислительные мощности,

2. Метод построения и комплексирования минимальных сечений для сетей разных видов ресурсов [1].

В данном методе выделяются следующие этапы поиска критически важных объектов:

- качественный анализ инфраструктуры крупных потребителей и взаимодействий между сетями для определения сетей, влияющих на функциональность этих потребителей и узлов сопряжения между видами гетерогенных сетей;
- построение путей между крупными потребителями одного ресурса и источниками этого ресурса, затем между крупными потребителями другого ресурса и источниками этого ресурса и т.д. для всех ресурсов;
- построение множества минимальных сечений, нарушающих снабжение ресурсами крупных потребителей из источников, для путей каждого вида ресурсов.

На этом этапе для каждого крупного потребителя и узла сопряжения по каждому ресурсу в отдельности строятся функции покрытия:

- для каждого крупного потребителя и узла сопряжения строятся минимальные сечения в виде дизъюнктивных нормальных форм (ДНФ);
- производится комплексирование ДНФ.

6 Выбор способа представления последствий отказа на принципиальной схеме и поэтажных планах

Для визуализации распространения негативных последствий повреждений отдельных узлов гетерогенных инженерных систем удобно использовать различные программные комплексы, например, ГИС. В тоже время, исходя из перечисленных выше особенностей инженерных инфраструктур, для зданий и сооружений следует, что создание многослойной модели в соответствии с подходом [4] весьма непростое занятие. Если каждый этаж с многообразием видов

сетей представить многими слоями, в том числе слоями межсетевых связей, тогда только для одного многоэтажного здания такая модель может содержать десятки слоев отображаемых в ГИС. Причем принципиальные схемы электроснабжения и др. внутри зданий являются детальными, что еще больше затрудняет прямое использование модели типа «слоеный пирог» в изложении [5].

В ИПУ РАН создан программный комплекс РДС [6, 7], для исследования и построения автоматизированных систем управления, на котором проводилось моделирование взаимодействия инженерных сетей, и визуализировались результаты расчета.

Рассматривались два вида представления различных инженерных инфраструктур:

- в виде набора схем, представленных в виде графа, описывающих работу и взаимодействие исследуемых инфраструктур;
- в виде набора поэтажных планов, на которых показано физическое размещение соответствующих объектов.

На принципиальных схемах, представленных в виде графа, удобно отслеживать распространение негативных последствий отказов, а на поэтажных планах можно оценивать пространственное влияние отказавших объектов на функционирование ОКС. На рис. 4 и 5 представлены примеры подобных схем.

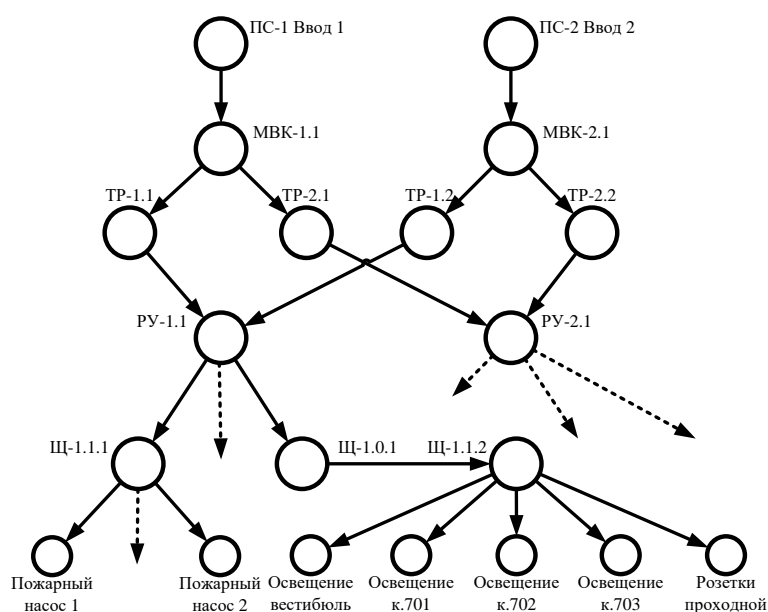


Рис. 4. Упрощенная принципиальная схема электроснабжения здания

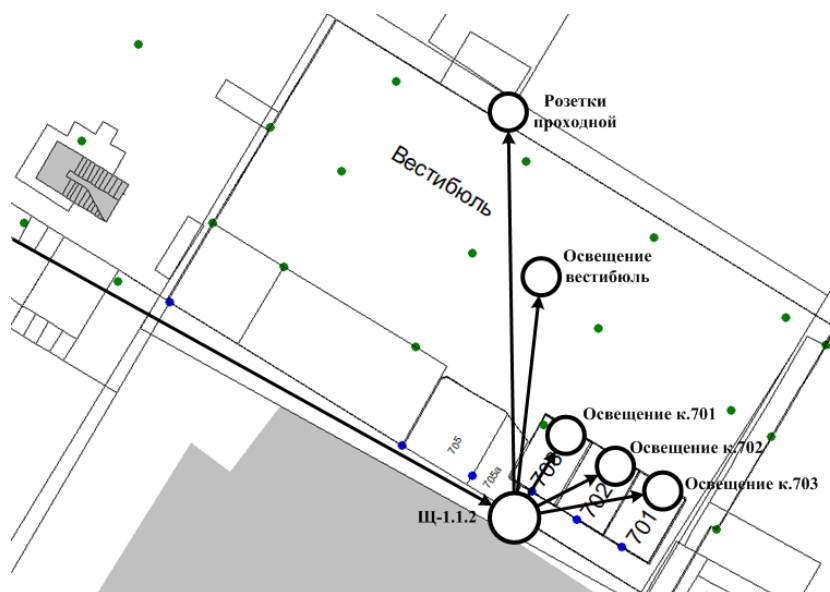


Рис. 4. Фрагмент поэтажного плана здания с размещенными на нем объектами электроснабжения

7 Последовательность действий при анализе взаимосвязанных инфраструктур зданий и сооружений

На первом этапе анализа производится декомпозиция сложной многослойной модели для зданий и сооружений, состоящей из разных инфраструктур, на более простые (по этажам здания).

Поиск критически важных объектов сетевых инженерных инфраструктур зданий и сооружений происходит на основе входе-выходной модели, которая показала эффективность в задачах анализа уязвимости сетевых структур.

Имитация распространения последствий отказа критически важных объектов по различным взаимосвязанным инженерным инфраструктурам зданий и сооружений производится путем построения путей доставки ресурсов для потребителей с помощью разработанной программы – диспетчера, определяющей переходы через узлы сопряжения между инфраструктурами.

После определения последствий выхода из строя критически важных объектов сетевых инженерных инфраструктур зданий и сооружений необходимо принимать решения предотвращению таких ситуаций.

Литература

1. *G. G. Grebenyuk, S. M. Nikish*, Blocking of Energy and Resource Supply of Target Objects in Network Infrastructures. *Autom. Remote Control*, 79:3 (2018), 535–544
2. *J Santos, L.May, Al Haimar* Risk-Based Input-Output Analysis of Influenza Epidemic Consequences on Interdependent Workforce Sectors. *Risk Anal.* 2013 Sep; 33(9): 1620–1635. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3640689>
3. *E. CagnoI, O Grande. P.Trucco* Towards an integrated vulnerability and resilience analysis for underground infrastructures Department of Management, Economics and Industrial Engineering - Politecnico di Milano Piazza Leonardo da Vinci, 32 – I-20133 Milano, ITALY ottavio.grande@polimi.it
4. *Гребенюк Г.Г., Дорри М.Х., Роцин А.А., Никушиов С.М.* A study of influence of the structure of Heterogeneous Engineering Networks on the Reliable Operation of Large Consumes / Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT2017, Moscow). М.: IEEE, 2017. Т. 2. С. 57-61.
5. *V.V. Valencia* Modeling for risk assessment on build infrastructure systems, Air force institute of technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 2013
6. *Дорри М.Х., Роцин А.А.* Расчет Динамических Систем (РДС). Описание пользователя. Часть I: устройство РДС и редактирование схем. М.: ИПУ РАН, 2013. – 358 с.
7. *Роцин А.А.* Расчет Динамических Систем (РДС) Руководство для программистов. М.: ИПУ РАН, 2011. – 656 с.