

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАСКАДНЫХ ЭФФЕКТОВ В ИНЖЕНЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Г.Г. Гребенюк

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: grebenuk@lab49.ru

С.М. Никишов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: nikishov@lab49.ru

Л.А. Серeda

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: sereda@lab49.ru

Ключевые слова: инженерные сети, техногенная безопасность, принципиальная схема, анализ распространения повреждений.

Аннотация: Приводятся отличия инженерных сетей зданий и сооружений от магистральных и распределительных сетей, обосновывающие изменение требований к созданию описанной в литературе многослойной модели распространения повреждений. Предложен подход к моделированию каскадных эффектов во взаимосвязанных инженерных сетях объектов капитального строительства, возникающих из-за повреждений в одной из инженерных систем.

1. Введение

Инженерная инфраструктура представляет собой совокупность инженерных сетей, расположенных на некоторой территории, объединяющей ее в единое целое, например, в городское поселение.

Процессы в инженерных сетях описываются сложными физическими закономерностями, позволяющими выполнить моделирование их работы с высокой степенью достоверности. Для качественного моделирования необходимы подробные технические характеристики таких объектов, получение которых, как правило, не представляется возможным.

Поэтому в мире широкое распространение получили топологические или графотеоретические модели анализа, для применения которых можно использовать схемы инженерных сетей, представляя их в виде графов.

Инженерные сети часто классифицируются по виду транспортируемого продукта: сети электроснабжения, водоснабжения, водоотведения (бытовая, ливневая, техниче-

ская канализация), теплоснабжения (с разными теплоносителями), газоснабжения, нефтепроводы и т.д.

На территории, обслуживаемой инженерной инфраструктурой находятся объекты капитального строительства (жилые и производственные строения, инженерные сооружения и т.д.), которые имеют свои внутренние инженерные инфраструктуры и которые, как правило, подключены к внешним распределительным сетям, являясь для них нагрузками. Между различного видами сетями внутри объекта капитального строительства также существуют взаимосвязи (например, повреждение в системе электро-снабжения может вызвать отключение электрических насосов и перебои водоснабжения).

Возрастающая плотность застройки, растущая насыщенность жилых строений бытовыми приборами, а научно-производственных зданий и сооружений – промышленными приборами и аппаратами увеличивает взаимную зависимость инженерных сетей, как внутри зданий и сооружений, так и вне их. Возрастает сложность анализа инфраструктурных взаимозависимостей и каскадных эффектов.

Возмущение от повреждения может передаваться по сетям и между сетями при наличии функциональных или географических взаимозависимостей между ними. Среди первых, как правило, исследованию подлежат физические зависимости, среди вторых анализируется пространственная близость сетевых объектов [1]. Например, взрыв газа при его утечке может вызвать повреждение находящихся вблизи электрических устройств, что приводит к нарушению электро-, тепло-, водоснабжения. Возможные последствия не только технические, такие как ремонты и восстановление, но также и социальные, поскольку указанные события вызывают социальное недовольство. Экономические, экологические и социальные последствия подобных явлений обуславливают необходимость совершенствования научных основ анализа сетевых взаимодействий.

При анализе рисков возникновения указанных последствий важно контролировать техническое состояние сетей и прогнозировать его изменение по статистике отказов, остаточному ресурсу и др. На основе прогноза можно формировать реальные сценарии отказов. По этой причине система анализа сетевых взаимодействий должна содержать подсистемы учета и технического обслуживания, анализа распространения повреждений и расчета рисков. Для каждого сценария отказа оценивается вызванная им неработоспособность как отдельных инженерных подсистем, входящих в исследуемую инфраструктуру, так и всей инфраструктуры в целом [2]. Делается это с использованием модели Леонтьева на основе матрицы взаимных влияний.

Не так много работ посвящено исследованию каскадных эффектов. В [3] предлагается метод распространения повреждения с использованием матриц смежности инфраструктур для г. Кремона. При числе инфраструктур n взаимодействие происходит на общей матрице размерностью 2^n . Географическая взаимозависимость реализуется через разбиение территории на квадраты (зоны) и «привязке» инфраструктур к ним. Так теплоснабжение в зоне А полностью зависит от электроснабжения в зоне В и эта зависимость отображается в матрице смежности географических зон. Подобное представление позволяет проанализировать географическое распространение повреждения и оценить его границы.

В [4] и в ряде других работ предлагается использовать многослойную модель пространства. Для каждого вида сетей формируется свой слой в ГИС и промежуточные слои для изображения функциональных связей между слоями. Исследование географической близости сетей и связанных с нею рисков повреждения одной сети от распространения неисправности по другой сети автоматически проводится по имеющимся в БД ГИС географическим координатам. На рис. 1 изображена многослойная модель.

Неисправность сети электроснабжения (слой 1) передается на насосы (слой 2) и далее распространяется на объекты теплоснабжения (слой 3).

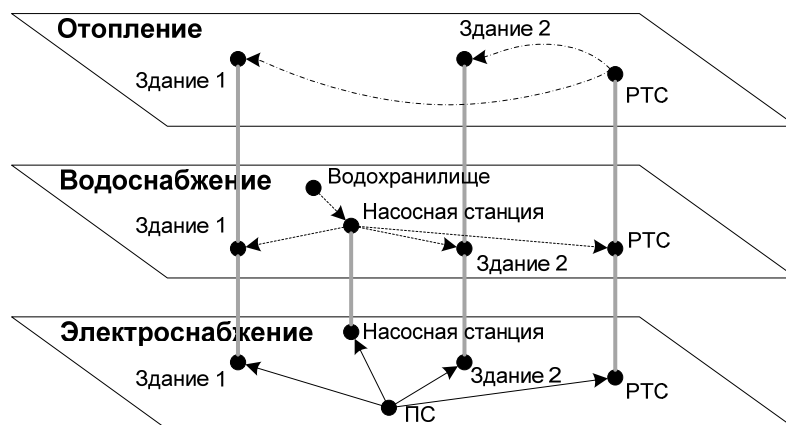


Рис. 1. Многослойная модель распространения повреждений.

2. Особенности инженерной инфраструктуры зданий и сооружений

В зарубежной и отечественной литературе практически отсутствуют примеры комплексного подхода «техническое обслуживание – сценарий повреждения – распространение – риски» для инженерной инфраструктуры не только зданий и сооружений, но и для большинства внешних сетевых инфраструктур. В тоже время потребность в комплексных системах безопасности зданий и сооружений велика. Именно в описанный класс задач попадают недавние тяжелые инциденты в торгово-развлекательных центрах и супермаркетах страны. Рассмотрим причины сложившегося положения путем выделения особенностей инженерных систем зданий и сооружений.

Инженерные инфраструктуры объектов капитального строительства имеют существенные отличия от магистральных и распределительных сетей территории, которые находят отражение в особенностях моделирования этих сетей.

Первое отличие. Каждая инженерная система жилого или производственного строения изображается в виде набора принципиальных схем или планов (по этажам, по строениям и т.д.), на которых указывается расположение элементов сети и обозначаются связи между ними. Такие схемы часто представлены на бумажных носителях или в виде рисунков в растровых форматах.

Второе отличие. Многообразие видов инженерных систем и их поэтажное расположение (рис. 2). 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. Научно-производственные 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 с использованием различных форматов в системах САПР) и топографической основы территории, которая, в основном, представлена в электронном виде с использованием различных ГИС.

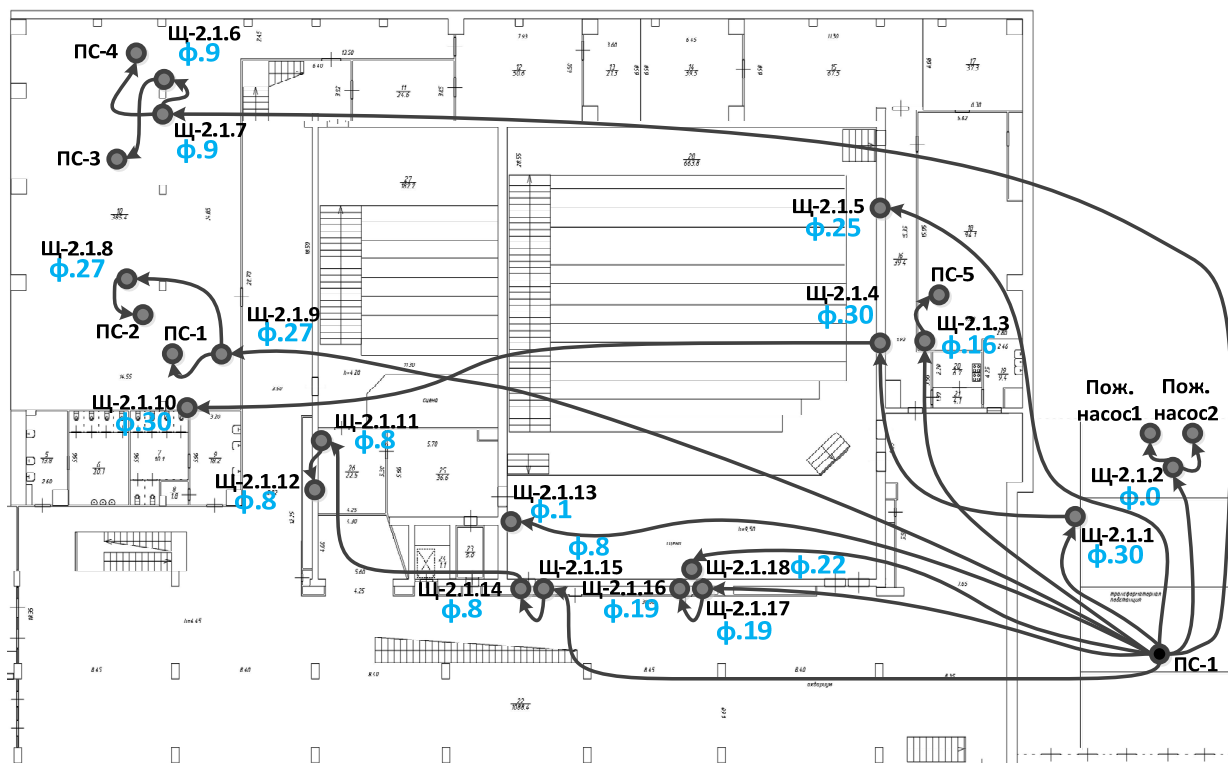


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема 1-го этажа административного здания.

Из указанных особенностей следует, что создание многослойной модели для зданий и сооружений в соответствии с принятым подходом 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 ГИС. Причем принципиальные схемы электропитания и др. внутри зданий являются детальными, что еще больше затрудняет прямое использование модели типа «слоеный пирог».

Таким образом, простое копирование принципов создания многослойной модели на основе ГИС для анализа инфраструктурных взаимодействий в инженерных сетях объектов капитального строительства потребует больших затрат и не является удобным для анализа распространения повреждений и расчета рисков.

3. Предложения по анализу сетевых и межсетевых взаимодействий

3.1. Формирование связей между инженерными подсистемами

При распространении возмущения будем рассматривать функциональную взаимосвязанность сетей, которая возникает, когда результат выполнения функций одной из сетей зависит от исправности другой сети.

Для модели распространения возмущения в системе, рассматриваемой как «система систем», рассмотрим в каждой инженерной подсистеме три набора объектов: источники ресурса $S1$, $S2$, преобразователи $T1$, $T2$ и коммуникации, потребители ресурса $P1$, $P2$. Примеры подсистем, отличающиеся структурой, приведены на рис. 3.

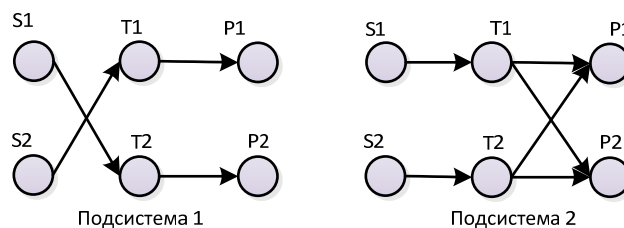


Рис. 3. Примеры подсистем, отличающиеся структурой.

Часть объектов рис. 3 могут одновременно принадлежать нескольким подсистемам. Функциональную взаимосвязанность объектов сетей различной природы предлагается устанавливать через общее наименование этих объектов в различных подсистемах.

Например, потребитель $P1$ подсистемы 1 (электродвигатель насоса водоснабжения) может одновременно являться приводом крыльчатки насоса $T1$ в подсистеме 2 и тогда $P1$ и $T1$ получают одно имя, скажем, «насос».

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

3.2. Построение принципиальных схем

Предлагаются следующий подход к построению многослойной модели распространения возмущения во взаимосвязанной инженерной инфраструктуре зданий и сооружений.

- Общие принципиальные схемы инженерных подсистем тепло-, электро- и др. зданий и сооружений представляются в виде набора отдельных план-схем (поэтажные, межэтажные, придомовые территории и т.д.) для каждого здания или сооружения в виде рисунка в растровом или векторном формате.
- При векторизации такой схемы образуется слой точечных объектов (источники ресурса S , преобразователи и связи T , потребители P) в виде графа. Полученный граф можно представить таблицей парных связей, связей между вершинами.

3.3. Разработка комплексной системы безопасности зданий и сооружений

Рассмотрим часть работы, касающуюся реализации модели распространения возмущения.

При формировании графа принципиальной схемы каждой подсистемы каждого этажа средствами САПР автоматически создаются две таблицы парных связей: таблица, связывающая объекты конкретной сети этажа, и таблица, связывающая потребителей с сетью. Для схемы на рис.2 фрагменты этих таблиц приведены ниже (таблица 1 и таблица 2 соответственно).

При анализе каждой отдельной подсистемы исследуются ее связи с другими подсистемами и влияние отказов исходной подсистемы на работоспособность связанных с ней подсистем. Указанные выше таблицы формируются в используемом САПР автоматически для каждой инженерной подсистемы каждого этажа. При агрегации отдельных инженерных подсистем, осуществляется их программное комплексирование в общую таблицу связей.

Для анализа применяются разработанные «быстрые» алгоритмы обхода графа, основанные на модификации метода поиска в ширину BFS и адаптированные к расчету распределительных сетей.

Таблица 1. Фрагмент таблицы парных связей объектов сети рис. 2.

Тр-р ПС-1	А-ф30 ПС-1
А-ф30 ПС-1	В-Щ-2.1.1
В-Щ-2.1.1	Щ-2.1.1
В-Щ-2.1.1	В-Щ-2.1.4
В-Щ-2.1.4	Щ-2.1.4
В-Щ-2.1.4	В-Щ-2.1.10
В-Щ-2.1.10	Щ-2.1.10
В-Щ-2.1.10	В-Щ-2.1.14
В-Щ-2.1.14	Щ-2.1.14
...	...

Таблица 2. Фрагмент таблицы парных связей «потребители – объекты сети» рис. 2.

Щ-2.1.10	Освещение коридор МКЗ
Щ-2.1.10	Освещение кладовая (1э)
Щ-2.1.10	Освещение диспетчерская (1э)
Щ-2.1.10	Освещение насосная (подвал)
...	...

Проблема циклов является важной для взаимосвязанной инженерной инфраструктуры. Она решается системой проверок при расчете каждой отдельной инженерной подсистемы.

Для автоматизированного создания граф-моделей принципиальных схем и визуализации результатов моделирования использован программный комплекс РДС, разработанный в ИПУ РАН.

4. Заключение

Выполнен анализ инфраструктурных систем зданий и сооружений, который показал их отличительные особенности и вызванную ими необходимость их учета при проектировании систем безопасности.

Предложен подход к анализу распространения повреждений во взаимосвязанных инфраструктурах, включающийся в себя:

- векторизации принципиальных схем на поэтажных планах с использованием САПР;
- агрегации схем поэтажных планов с использованием таблиц связей;
- расчет распространения отказа по взаимосвязанным инфраструктурам;
- визуализация результатов расчета.

Список литературы

1. Grebenyuk G.G., Nikishov S.M. Blocking of Energy and Resource Supply of Target Objects in Network Infra-structures // Automation and Remote Control. 2018. Vol. 79, No. 4. P. 535-544.

2. Santos J., May L., Haimar Al. Risk-Based Input-Output Analysis of Influenza Epidemic Consequences on Interdependent Workforce Sectors // Risk Anal. 2013. Vol. 33, No. 9. P. 1620–1635. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3640689>
3. Cagno I. E., Grande O., Trucco P. Towards an integrated vulnerability and resilience analysis for underground infrastructures. https://www.researchgate.net/publication/229038590_Towards_an_integrated_vulnerability_and_resilience_analysis_for_underground_infrastructures
4. Milanović J.V., Wentao Zhu. Cyber-physical system failure analysis based on Complex Network theory// IEEE EUROCON 2017 – 17th International Conference on Smart Technologies. Ohrid, Macedonia, 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8011177>