

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,  
COMPPUTER ENGINEERING  
AND MANAGEMENT

УДК 620.9. 001.57 (470+571)

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-41-58

## Разработка геоинформационной системы для исследования живучести систем энергетики\*

Г.К. ДАНИЛОВ<sup>а</sup>, А.В. ЕДЕЛЕВ<sup>б</sup>

664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

<sup>а</sup> [dangleb@isem.irk.ru](mailto:dangleb@isem.irk.ru) <sup>б</sup> [flowers@isem.irk.ru](mailto:flowers@isem.irk.ru)

Эта статья описывает причины создания инструментария для исследования живучести систем энергетики с помощью возможностей геоинформационных технологий на примере программного пакета «Нефть и газ России». Описывается метаматематическая модель системы и ее разделение на основные составляющие: топологическую и функциональную, где структурная модель отражает топологию энергетической сети в виде графа, а функциональная модель оценивает производительность с учетом как топологических возможностей, так и функциональных ограничений. Рассматриваются примеры использования геоинформационных систем в исследовании живучести и описания требований при разработке инструментария для новой метаматематической модели. Рассказывается об архитектуре текущей версии «Нефть и газ России», ее особенностях и проблемах, которые повлияли на разработку нового инструментария. Приводятся причины использования и особенности прикладного программного интерфейса QT во время разработки инструментария.

Новый инструментарий предполагает использование архитектуры «модель – представление – контроллер», что позволяет модифицировать каждый компонент независимо от другого. Данная архитектура также помогает «отвязать» топологическую и функциональную составляющие посредством инкапсуляции топологической модели в виде отдельного графа, а для связи с функциональной составляющей использовать контроллер. Это дает возможность использовать разные типы функциональных моделей без необходимости изменять топологическую модель. Для каждой функциональной модели используется свой контроллер, который настраивает свой поток данных. Таким образом, предлагаемые изменения комплекса «Нефть и газ России» позволят перейти при исследовании живучести от моделирования отдельных систем энергетики к топливно-энергетическому комплексу страны в целом.

---

\* Статья получена 31 мая 2021 г.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWEU-2021-0003 № AAAA-A21-121012090014-5 программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» Минобрнауки России (проект № 13.ЦКП.21.0038).

**Ключевые слова:** система энергетики, живучесть, уязвимость, геоинформационная система, базы данных, графический интерфейс пользователя, программно-вычислительный комплекс, математическая модель

## ВВЕДЕНИЕ

Живучестью системы энергетики (СЭ) называется ее свойство адаптироваться к различным крупным возмущениям и восстанавливаться до того состояния, в котором она находилась до их воздействия [1]. Идентичным живучести понятием в зарубежной литературе является *resilience* [2, 3].

Современная схема исследования живучести / *resilience* СЭ [4], показанная на рис. 1, строится на изучении и анализе системных возможностей к адаптации к крупным возмущениям и восстановлению после их воздействия [5, 6], на количественной оценке живучести СЭ [7] и выработке стратегий по ее повышению [8–14].

Анализ уязвимости [15, 16] играет центральную роль в исследовании живучести СЭ (рис. 1). Уязвимость отражает пассивную реакцию системы на крупное возмущение [17].

Как показано на рис. 1, исходными данными для анализа уязвимости являются информация о функционировании и развитии СЭ, классы возмущений и мероприятия по повышению живучести.

Информация о функционировании и развитии СЭ, включающая в себя природно-климатические и социально-экономические данные мониторинга энергетических объектов, является результатом традиционных общеэнергетических исследований [18].

Возмущения делятся на следующие классы:

- стихийные бедствия, такие как наводнения, землетрясения, ураганы и т. д. [19];
- техногенные катастрофы, вызванные отказом компонент или подсистем [20];
- преднамеренные (умышленные) нарушения, такие как террористические акты, кибератаки и т. д. [21].

Мероприятия по улучшению живучести СЭ [8–14, 22] можно классифицировать по трем основным группам по отношению к возмущению как к событию. Перед возникновением возмущения проводится учет и оценка энергетического оборудования, находящегося в простое, резерве, ремонте, а также подготовка СЭ к любому возможному крупному возмущению с помощью повышения защищенности объектов. Во время возмущения сеть СЭ реконфигурируется, подключаются резервные источники и накопители, хранилища, происходит перераспределение имеющихся ресурсов и сброс нагрузки для приспособления системы к возмущению и его последствиям. После возмущения происходит возврат СЭ в нормальное или близкое к нему состояние путем обратной реконфигурации сети, перезапуска основных источников и восстановления поврежденных объектов, составляются планы по повышению живучести СЭ [8].

Планирование повышения живучести СЭ в целом может быть долгосрочным и краткосрочным [23]. Долгосрочные планы включают в себя модернизацию и реконструкцию магистральных и распределительных сетей,

развертывание средств измерения и контроля, резервирование оборудования и передислокацию производственных мощностей. Краткосрочные планы включают в себя управление спросом, использование микросетей и источников распределенной генерации, внедрение современных методов визуализации и прогнозирования, а также децентрализованных методов управления [8].

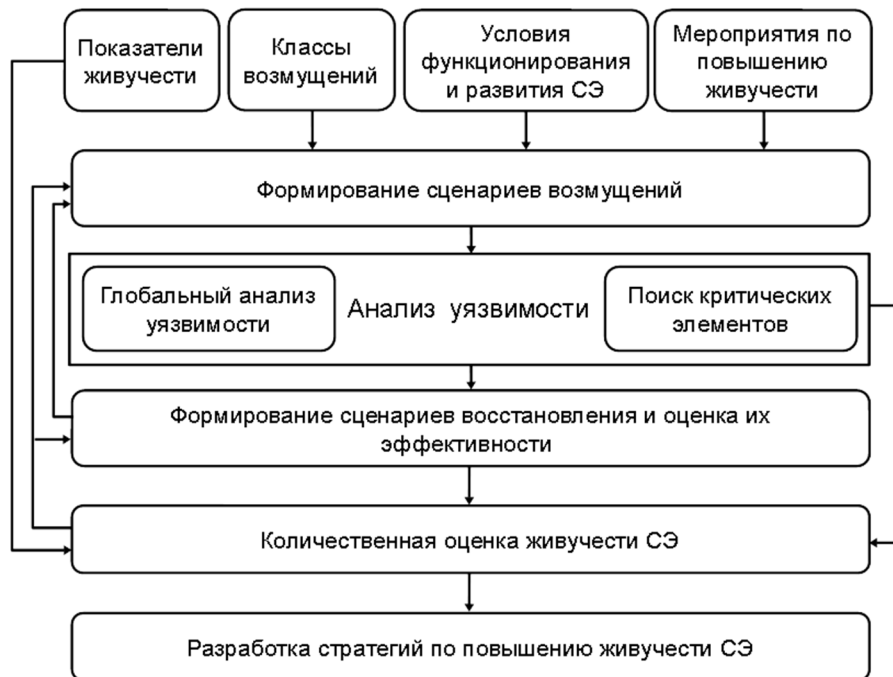


Рис. 1. Общая схема исследования живучести / resilience СЭ

Fig. 1. General scheme of ES resilience research

Главной целью анализа уязвимости СЭ является выявление недостатков в конструкции и механизмах управления системой, которые могут способствовать распространению крупного возмущения по ней самой и также по взаимосвязанным системам [17].

Анализ уязвимости СЭ [24] начинается с формирования множества возможных состояний СЭ, отражающих наиболее представительные или характерные сочетания внешних условий их развития и функционирования в рассматриваемом временном интервале. А также согласно заданным классам формируются сценарии возмущений, описывающие их воздействие на СЭ. Далее анализ уязвимости разбивается на виды, такие как глобальный анализ уязвимости и поиск критических элементов [15, 20].

Общее влияние возмущений на работоспособность СЭ является целью глобального анализа уязвимости. Он проводится путем моделирования серии возмущений с постепенно увеличивающейся степенью воздействия и соответственно возрастающей величиной последствий для системы. Такие вычислительные эксперименты позволят определить пороговые значения воздействия для определенных классов возмущений, превышение которых будет вызывать распад рассматриваемой СЭ на несвязанные части [15, 20].

Поиск критических элементов ориентирован на определение элементов, одиночный или групповой отказ которых вызывает наибольшее снижение работоспособности СЭ в целом. Ключевой момент здесь заключается в том, чтобы обнаружить все, даже неожиданные, наборы критических элементов [20].

Этап формирования сценариев восстановления СЭ и оценки их эффективности связан с этапом анализа уязвимости, так как наискорейшее восстановление системы зависит от нанесенного ущерба, наличия доступа к поврежденным элементам и имеющихся резервов людских, технических и финансовых ресурсов [6]. Эти исходные данные используются для реализации мероприятий по повышению живучести СЭ, относящихся к восстановлению системы. Хотя эти мероприятия и повышают производительность системы, часто она не может быстро вернуться к тому уровню, что был до возмущения. Это в основном определяется значительностью последствий возмущения и продолжительностью операций по восстановлению элементов СЭ.

В литературе предлагается множество разнообразных показателей для количественной оценки живучести [7, 8, 10]. Эти показатели в целом характеризуют производительность системы. В них также в полной мере должен быть отражен временной аспект, поскольку производительность реальной СЭ после возникновения крупного возмущения значительно меняется с течением времени. Последствия такого возмущения не могут быть должным образом измерены с помощью традиционных показателей надежности, поскольку последние характеризуют вероятность и частоту рядовых перебоев в энергоснабжении, а также величину непокрытой нагрузки. Хотя показатели надежности могут дать исследователю некоторую дополнительную информацию об аномальном поведении СЭ, статический характер этих показателей делает их непригодными для измерения пространственно-временных последствий воздействия крупного возмущения на СЭ [16].

Процедура, состоящая из этапов изучения и анализа возможностей СЭ к адаптации и восстановлению, а также из количественной оценки живучести, имеет итеративный характер (рис. 2) и называется циклом повышения живучести [26]. На основе результатов последнего вырабатываются стратегии по повышению живучести СЭ, цель которых заключается в улучшении реакции СЭ в ответ на воздействие рассматриваемых крупных возмущений в будущем.

Решение о включении мероприятия в стратегию и его очереди на реализацию в ней зависит от многих факторов. Некоторые из мероприятий более эффективны в повышении живучести СЭ, а другие более выгодны с точки зрения требуемых людских, технических и финансовых ресурсов. Здесь возникает проблема правильного подбора критериев. Так, с одной стороны, вклад мероприятия в повышение живучести СЭ может быть оценен с различных перспектив [27], а с другой стороны, для выработки долгосрочных и краткосрочных стратегий должны использоваться свои отличающиеся наборы показателей количественной оценки живучести [26].

Для оптимального планирования реализации мероприятий при наличии ресурсных ограничений [28, 23] в отдельной стратегии по повышению живучести СЭ могут применяться многошаговые методы принятия решений в условиях неопределенности [29, 30].

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЭ В КОМПЛЕКСНОМ АНАЛИЗЕ УЯЗВИМОСТИ

В статье [31] представлен новый подход к комплексному анализу уязвимости СЭ, основанный на работах [15, 20]. Он обеспечивает:

- рассмотрение взаимосвязей разных типов;
- возможность количественной оценки уязвимости с нескольких точек зрения (например, топологической и функциональной, статической и динамической);
- универсальность по отношению к различным классам возмущений и разным уровням территориальной и технологической иерархии;
- эффективное применение высокопроизводительных вычислений для ускорения расчетов и анализа их результатов.

Моделирование СЭ в подходе [31] строится на следующих положениях.

1. Модель СЭ явным образом разделяется на топологическую и функциональную составляющие. Структурная модель отражает топологию СЭ в виде графа. Его узлы и дуги представляют элементы системы в детальном или агрегированном виде. Функциональная модель иллюстрирует распределения потоков энергоресурса по сети СЭ [20].

2. Если рассматриваются взаимосвязанные СЭ, то они представляются в виде метасистемы (рис. 2). Топология метасистемы описывается объединенными структурными моделями отдельных систем, а моделирование функционирования строится на основе взаимодействия соответствующих функциональных моделей [15].

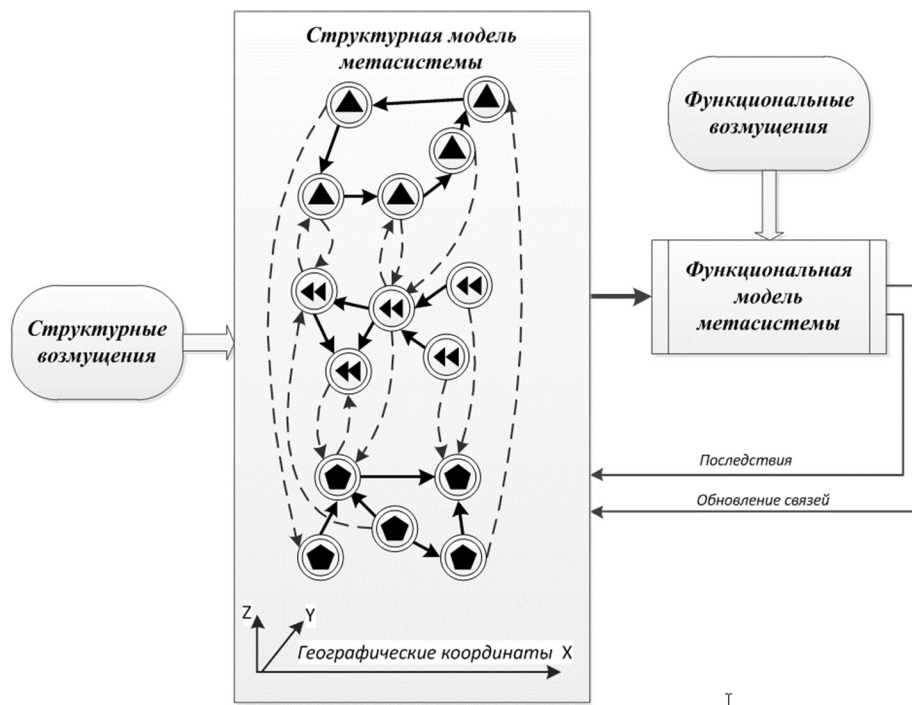


Рис. 2. Моделирование взаимосвязанных СЭ при воздействии крупных возмущений

Fig. 2. Modeling of interconnected ES under the influence of large disturbances

Воздействие крупных возмущений на метасистему приводит к деформации ее структуры или деградации ее функциональных возможностей (рис. 2), что в обоих случаях является причиной падения производительности систем. За изменение системной топологии отвечают структурные возмущения, сценарий которых состоит из поочередного или одновременного удаления узлов и дуг графа. Сценарий функциональных возмущений обычно выражается в виде снижения производственных мощностей СЭ.

Географические координаты элементов метасистемы учитываются при моделировании возмущений, имеющих пространственную привязку.

Процедуры анализа уязвимости состоят из следующих основных этапов.

1. Формирование группы элементов метасистемы, сформированной из взаимосвязанных СЭ.

2. Формирование сценария крупного возмущения, который описывает разовое или многошаговое воздействие на группу элементов в виде их удаления из структурной модели метасистемы или ухудшения условий их функционирования.

3. Выбор показателей измерения падения производительности отдельных СЭ.

4. Моделирование крупного возмущения и количественная оценка его последствий (падения производительности СЭ) на каждом временном шаге с помощью показателей, выбранных на предыдущем этапе.

5. Обработка последствий возмущений (оценка важности элементов, формирование зависимостей и т. д.).

## **2. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АНАЛИЗЕ ЖИВУЧЕСТИ / RESILIENCE СЭ**

Геоинформационные системы (ГИС) используются для отображения территориально-производственной структуры СЭ [32], например, при выработке мероприятий по повышению живучести [33].

В анализе уязвимости ГИС используются для представления результатов расчетов на функциональной модели [31, 34, 35]. Электронные карты создаются на информации топологической модели [32].

## **3. ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС «НЕФТЬ И ГАЗ РОССИИ»**

Программно-вычислительный комплекс «Нефть и газ России» [36] используется для исследования живучести систем газоснабжения, нефте- и нефтепродуктоснабжения России [37, 38]. Текущая структура комплекса показана на рис. 3.

В настоящее время необходима модернизация программно-вычислительного комплекса «Нефть и газ России» по следующим причинам:

- адаптация к положениям моделирования СЭ нового подхода к комплексному анализу уязвимости;
- замена морально устаревшей реляционной системы управления базами данных Paradox на одну из современных компактных.

На текущий момент основным принципом построения программного обеспечения является объектно ориентированный подход [39].

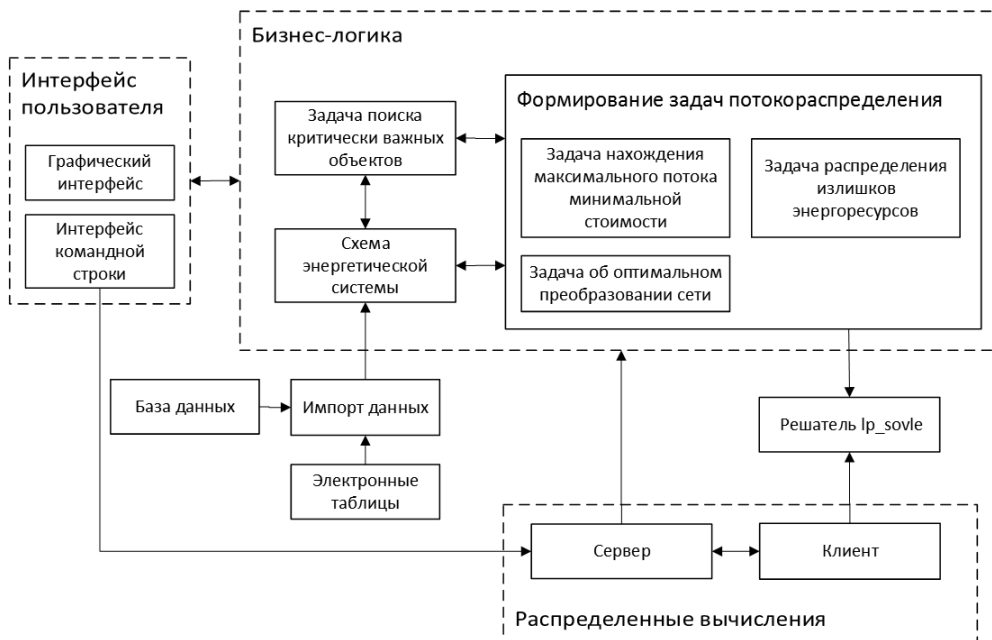


Рис. 3. Компоненты программно-вычислительного комплекса «Нефть и газ России»

Fig. 3. Components of the Oil and Gas of Russia software and computing complex

С момента появления объектно ориентированного подхода (80-е годы прошлого столетия) появилось множество различных парадигм, уточняющих и дополняющих его [40]. Если проследить преемственность некоторых популярных парадигм построения ПО (рис. 4), то, исходя из принципа минимизации сложности программного обеспечения [41], получится следующая иерархия [42]:

- модульность и абстракция, KISS [43], DRY [44];
- процедурное программирование, объектно ориентированный подход [45], Driven Development [46];
- шаблоны проектирования [47, 48], SOLID [49].

Одним из шаблонов проектирования является архитектура приложения, организованная в виде тройки «модель – вид – контроллер». Для выполнения первого пункта предлагается перейти на нее (рис. 5).

Архитектура «модель – вид – контроллер» иллюстрирует разделение данных, пользовательского интерфейса и управляющей логики на три отдельных компонента: модель, представление и контроллер.

Данная архитектура позволяет разделить топологическую и функциональную модели метасистемы посредством инкапсуляции топологической модели в виде отдельного графа. Граф содержит лишь необходимую для построения информацию об объектах СЭ, включая тип объекта, географические данные, его названия и основные характеристики. Для связи с функциональной моделью используется контроллер. Он позволяет настроить поток данных и стандартизировать информацию для ее отображения в топологической

модели. Это дает возможность использовать разные типы функциональных моделей без необходимости изменять топологическую модель. Для каждой функциональной модели используется свой контроллер, который настраивает свой поток данных.



Рис. 4. Иерархия парадигм построения ПО

Fig. 4. The hierarchy of software construction paradigms

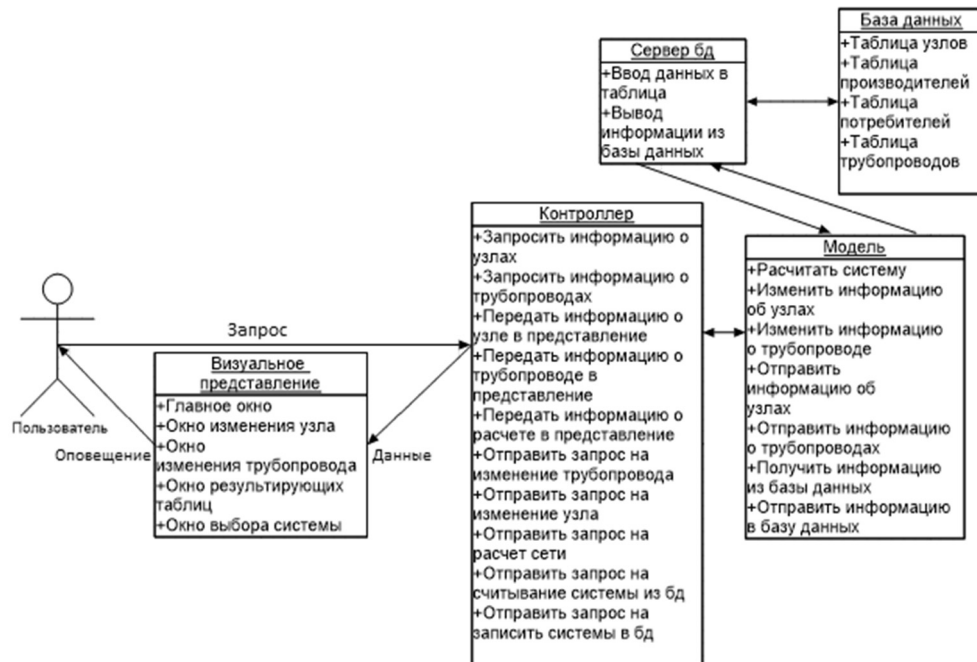


Рис. 5. Новая архитектура программно-вычислительного комплекса «Нефть и газ России»

Fig. 5. A new architecture of the Oil and Gas of Russia software and computing complex



При переходе на данную архитектуру и для разработки приложения была выбрана среда QT. Данная среда имеет несколько отличительных возможностей, которые упрощают разработку данной архитектуры.

- Метаобъектная система. Эта особенность фреймворка позволяет использовать сигналы и слоты для разработки программного обеспечения. В данном случае при разработке представления топологической модели можно использовать механизм слотов и сигналов для разработки поведения, получения и отправки информации из приложения в стандартном плане, а после этого, используя контроллер, определить и интерпретировать данную информацию для функциональной модели.

- Библиотеки для работы и отображения геоинформационных данных. Позволяет, используя метаобъектную систему, отображать объекты на карте, а также производить действия с ними (например, узнать расстояние между двумя узлами).

- Библиотеки для работы с базой данных SQLite.

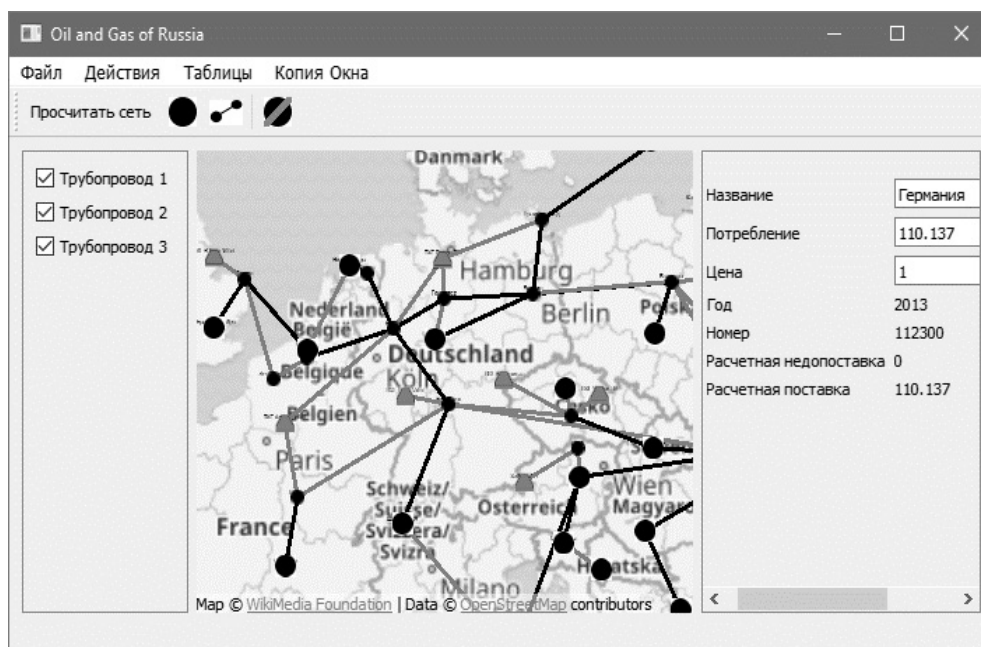


Рис. 6. Внешний вид прототипа специализированной ГИС

Fig. 6. The layout of the specialized GIS prototype

Архитектура «модель – вид – контроллер» позволяет модифицировать каждый компонент независимо от другого. Роль модели выполняет функциональная модель метасистемы или отдельной СЭ. Представление (рис. 6) ассоциируется с топологической моделью отдельной СЭ. Число видов в случае взаимосвязанных СЭ соответствует их числу.

Для работы с функциональной моделью метасистемы или отдельной СЭ используется класс EventChannel, который получает запросы от среды на получение или внесение информации в функциональную модель, тем самым не привязывая интерфейс к конкретной функциональной модели, что позволит

в будущем использовать данную схему классов для разработки под другие функциональные модели.

Классы `deleteNodeCommand`, `DeleteLeaseCommand`, `InsertNodeCommand`, `InsertLeaseCommand`, `UpdateNodeCommand`, `UpdateLeaseCommand` используются для создания запросов на добавление, изменение или удаление информации из функциональной модели. Данные классы разработаны с помощью шаблона программирования «Команда» и наследуют интерфейс `VCommand`, в котором указаны базовые функции для отмены и возврата информации.

Классы `VisualSystem`, `VisualLease`, `VisualNode` разработаны для отображения географической информации об объектах (рис. 7), абстрагированы от расчетного модуля и хранят только важную для отображения информацию, позицию и тип объекта.

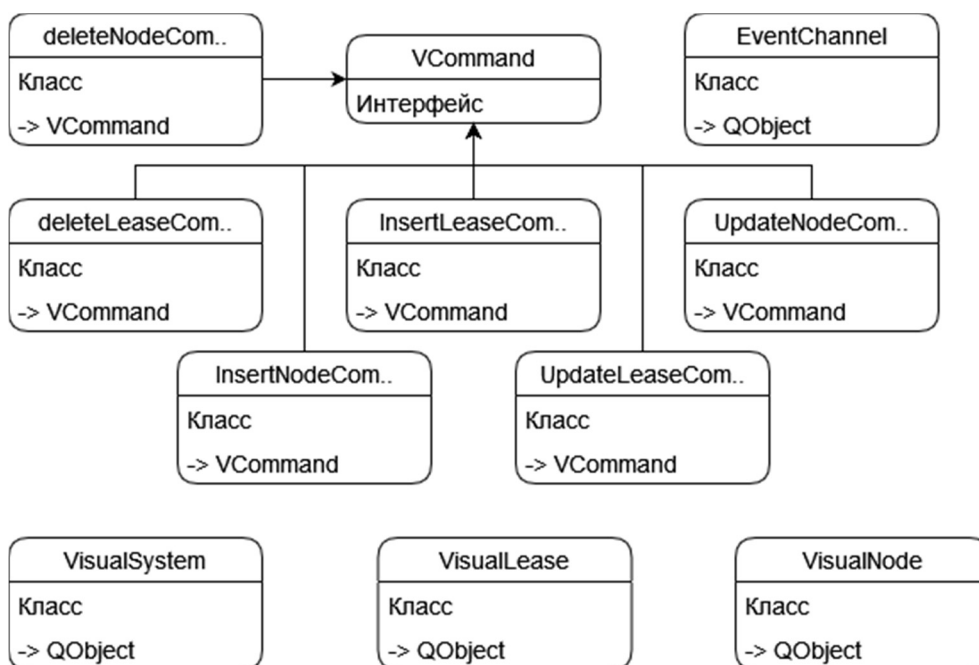


Рис. 7. Диаграмма классов, соответствующая топологической модели метасистемы

Fig. 7. Class diagram corresponding to the topological model of the metasytem

Предлагаемая структура реляционной базы данных, показанная на рис. 8, отражает явное разделение моделирования СЭ на топологическую и функциональную составляющие.

Список справочников базы данных, необходимых для создания топологической модели, включает в себя:

- справочник всех узлов, содержащий их уникальные коды, названия, географические координаты;
- справочник участков трубопроводов с информацией о начальных и конечных узлах, уникальным кодом и датой ввода в эксплуатацию.

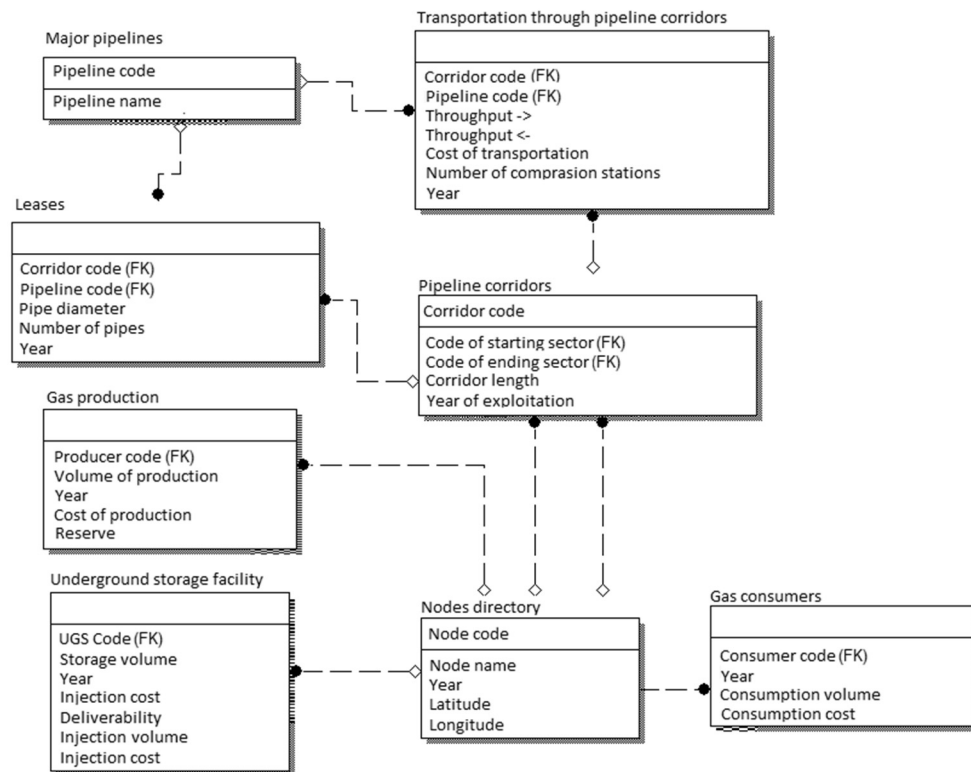


Рис. 8. Структура реляционной базы данных

Fig. 8. The relational database structure

Для создания функциональной модели необходимы следующие справочники:

- справочник трубопроводов;
- справочники потребителей, производителей и подземных хранилищ газа с их функциональными характеристиками;
- справочник пропускных способностей участков трубопроводов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью изменения программно-вычислительного комплекса «Нефть и газ России» является внедрение нового подхода к комплексному анализу уязвимости СЭ. Новый подход обеспечивает:

- рассмотрение взаимосвязей разных типов;
- возможность количественной оценки уязвимости с нескольких точек зрения;
- универсальность по отношению к различным классам возмущений и разным уровням территориальной и технологической иерархии.

Модификация комплекса «Нефть и газ России» заключается в основном в переходе на новую архитектуру типа «модель – вид – контроллер». Такая архитектура разделяет программу на три отдельных компонента и позволяет модифицировать их независимо друг от друга.

Помимо перехода на новую архитектуру, также предлагается внедрение одной из современных компактных реляционных систем управления базами данных, так как используемая в настоящее время система является морально устаревшей.

Таким образом, предлагаемые изменения комплекса «Нефть и газ России» позволят перейти в исследовании живучести от моделирования отдельных СЭ к топливно-энергетическому комплексу страны в целом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные методические принципы исследования и обеспечения живучести систем энергетики / Н.И. Воропай, Л.Д. Криворуцкий, Ю.Н. Руденко, И.А. Шер // Методы и модели исследования живучести систем энергетики / отв. ред. Ю.Н. Руденко. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 9–17.
2. Voropai N., Rehtanz C. Flexibility and resiliency of electric power systems: analysis of definitions and content // EPJ Web of Conferences. – 2019. – Vol. 217. – P. 1018.
3. Воропай Н.И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // Электричество. – 2020. – № 7. – С. 12–21.
4. A review on resilience assessment of energy systems / P. Gasser, P. Lustenberger, M. Cinelli, W. Kim, M. Spada, P. Burgherr, S. Hirschberg, B. Stojadinović, T.Y. Sun // Sustainable and Resilient Infrastructure. – 2021. – Vol. 6 (5). – P. 273–299.
5. System resilience enhancement: Smart grid and beyond / G. Huang, J. Wang, C. Chen, C. Guo, B. Zhu // Frontiers of Engineering Management. – 2017. – Vol. 4 (3). – P. 271–282.
6. Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards / S. Espinoza, M. Panteli, P. Mancarella, H. Rudnick // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 136. – P. 352–361.
7. Metrics for energy resilience / P.E. Roegel, Z.A. Collier, J. Mancillas, J.A. McDonagh, I. Linkov // Energy Policy. – 2014. – Vol. 72. – P. 249–256.
8. Hussain A., Bui V.H., Kim H.M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience // Applied Energy. – 2019. – Vol. 240. – P. 56–72.
9. Resilience: theory and application / J.L. Carlson, R.A. Haffenden, G.W. Bassett, W.A. Buehring, M.J. Collins III, S.M. Folga, F.D. Petit, J.A. Phillips, D.R. Verner, R.G. Whitfield. – Argonne, IL, 2012. – (Argonne National Laboratory; ANL/DIS-12-1). – 60 p.
10. Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J.E. A review of definitions and measures of system resilience // Reliability Engineering and System Safety. – 2016. – Vol. 145. – P. 47–61.
11. Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions / C. Wan, Z. Yang, D. Zhang, X. Yan, S. Fan // Transport Reviews. – 2018. – Vol. 38 (4). – P. 479–498.
12. Battling the extreme: a study on the power system resilience / Z. Bie, Y. Lin, G. Li, F. Li // Proceedings of the IEEE. – 2017. – Vol. 105, N 7. – P. 1253–1266.
13. Sharifi A., Yamagata Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: a literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 60. – P. 1654–1677.
14. Lin Y., Bie Z., Qiu A. A review of key strategies in realizing power system resilience // Global Energy Interconnection. – 2018. – Vol. 1 (1). – P. 70–78.
15. Johansson J., Hassel H. An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis // Reliability Engineering and System Safety. – 2010. – Vol. 95 (12). – P. 1335–1344.
16. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures // Reliability Engineering and System Safety. – 2016. – Vol. 152. – P. 137–150.
17. Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience / A. Gholami, T. Shekari, M.H. Amirioun, F. Aminifar, M.H. Amini, A. Sargolzaei // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 32035–32053.

18. Иерархическое моделирование систем энергетики / под ред. Н.И. Воропая, В.А. Стеникова. – Новосибирск: Гео, 2020. – 314 с.
19. *Jufri F.H., Widiputra V., Jung J.* State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies // *Applied Energy*. – 2019. – Vol. 239. – P. 1049–1065.
20. *Jonsson H., Johansson J., Johansson H.* Identifying critical components in technical infrastructure networks // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. O: Journal of Risk and Reliability*. – 2008. – Vol. 222 (2). – P. 235–243.
21. *Hausken K.* Defence and attack of complex interdependent systems // *Journal of the Operational Research Society*. – 2019. – Vol. 70 (3). – P. 364–376.
22. A review of the measures to enhance power systems resilience / M. Mahzarnia, M.P. Moghaddam, P.T. Baboli, P. Siano // *IEEE Systems Journal*. – 2020. – Vol. 14 (3). – P. 4059–4070. – DOI: 10.1109/JSYST.2020.2965993.
23. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4 т. Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.
24. *Sperstad I.B., Kjolle G.H., Gjerde O.* A comprehensive framework for vulnerability analysis of extraordinary events in power systems // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2020. – Vol. 196. – P. 106788.
25. *Panteli M., Mancarella P.* The grid: Stronger, bigger, smarter? Presenting a conceptual framework of power system resilience // *IEEE Power and Energy Magazine*. – 2015. – Vol. 13 (3). – P. 58–66.
26. *Han F., Zio E.* A multi-perspective framework of analysis of critical infrastructures with respect to supply service, controllability and topology // *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. – 2019. – Vol. 24. – P. 1–13.
27. Resilient critical infrastructure planning under disruptions considering recovery scheduling / Y. Fang, C. Fang, E. Zio, M. Xie // *IEEE Transactions on Engineering Management, Institute of Electrical and Electronics Engineers*. – 2019. – Vol. 68 (2). – P. 452–466.
28. *Ouyang M., Fang Y.* A mathematical framework to optimize critical infrastructure resilience against intentional attacks // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. – 2017. – Vol. 32 (11). – P. 909–929.
29. *Fang Y., Zio E.* Resilience management of infrastructure systems from a multistage decision making perspective // 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL2019). – Hannover, Germany, 2019. – P. 3382–3389. – DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3.
30. *Edelev A.V., Zorkaltsev V.I.* An algorithm for determining optimal and suboptimal trajectories of the development of a system // *Journal of Applied and Industrial Mathematics*. – 2019. – Vol. 13 (1). – P. 36–42.
31. Поддержка управления живучестью систем энергетики на основе комбинаторного подхода / И.В. Бычков, С.А. Горский, А.В. Еделев, Р.О. Костромин, И.А. Сидоров, А.Г. Феоктистов, Е.С. Фереферов, Р.К. Федоров // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2021. – № 6. – С. 122–135.
32. *Еделев А.В., Сендеров С.М., Пяткова Н.И.* Применение геоинформационных технологий для исследования проблем энергетической безопасности // *Проблемы управления*. – 2015. – № 2. – С. 68–74.
33. *Scholz Y.* Renewable energy based electricity supply at low costs: development of the remix model and application for Europe: PhD Dissertation / Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart. – Stuttgart, 2012. – 181 p. – URL: [http://elib.dlr.de/77976/1/REMix\\_Thesis\\_YS.pdf](http://elib.dlr.de/77976/1/REMix_Thesis_YS.pdf) (accessed: 11.02.2022).
34. *Edelev A., Fereferov E.S.* A software platform to support the energy system resilience study // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2020. – Vol. 2638. – P. 79–88.
35. *Edelev A.V., Fereferov E.S., Khmel'nov A.E.* Workbench for vulnerability analysis of Vietnam energy sector // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2020. – Vol. 2677. – P. 23–35.

36. Воробьев С.В., Еделев А.В. Особенности математического моделирования при распределении излишков газа в Единой системе газоснабжения России // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 1 (62). – С. 181–194. – DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-181-194.
37. Клименко С.М., Сендеров С.М., Янченко В.А. Исследование проблем повышения устойчивости и экологической безопасности магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов // Новые информационные технологии управления развитием и функционированием трубопроводных систем энергетики. – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1993. – С. 119–127.
38. Еделев А.В., Сендеров С.М. Интегрированная инструментальная среда ПВК «Нефть и газ России» // Информационные технологии в энергетике: современные подходы к анализу и обработке информации: труды Всероссийского семинара. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2000. – С. 165–169.
39. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений / Г. Буч, Р.А. Максимчук, М.У. Энгл, Б.Дж. Янг, Д. Коналлен, К.А. Хьюстон. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2008. – 720 с.
40. The Software Architecture Chronicles. – URL: <https://herbertograca.com/2017/07/03/the-software-architecture-chronicles/> (accessed: 17.02.2022).
41. McConnell S. Code complete. – 2nd ed. – Redmond, WA: Microsoft Press, 2004. – 960 p.
42. Баранов В. Иерархия принципов проектирования, или самые важные слова для инженеров. – URL: <https://habr.com/ru/post/169487/> (дата обращения: 17.02.2022).
43. Raymond E.S. The Unix philosophy in one lesson // Raymond E.S. The Art of Unix Programming. – Addison-Wesley, 2003. – ISBN 0-13-142901-9.
44. Hunt A., Thomas D. The pragmatic programmer: from journeyman to master. – 1st ed. – Reading, MA: Addison-Wesley, 1999. – 320 p. – ISBN 978-0201616224.
45. Переверза Д. TDDx2, BDD, DDD, FDD, MDD и PDD, или все, что вы хотите узнать о Driven Development. – URL: <https://habr.com/ru/post/459620> (дата обращения: 17.02.2022).
46. Design patterns: elements of reusable object-oriented software / E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J.M. Vlissides. – Reading, MA: Addison-Wesley, 1995. – 395 p.
47. Рогачев С. Обобщенный Model-View-Controller. – URL: <http://rsdn.org/article/patterns/generic-mvc.xml> (дата обращения: 17.02.2022).
48. Мартин Р.К., Ньюкирк Д.В., Косс Р.С. Быстрая разработка программ: принципы, примеры, практика. – М.: Вильямс, 2004. – 744 с.

*Данилов Глеб Константинович*, инженер-исследователь лаборатории живучести систем энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Основное направление научных исследований – математическое моделирование, оптимизация, параллельные вычисления. E-mail: [dangleb@isem.irk.ru](mailto:dangleb@isem.irk.ru)

*Еделев Алексей Владимирович*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории живучести систем энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Основное направление научных исследований – исследование живучести топливно-энергетического комплекса. Имеет более 45 печатных работ. E-mail: [flower@isem.irk.ru](mailto:flower@isem.irk.ru)

*Danilov Gleb K.*, research engineer in the laboratory of energy system resilience, the Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on mathematical modeling, optimization methods and parallel computing. E-mail: [dangleb@isem.irk.ru](mailto:dangleb@isem.irk.ru)

*Edelev Aleksey V.*, PhD (Eng.), Senior Researcher in the laboratory of energy system resilience, Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on the energy system resilience. He is the author of more than 45 publications. E-mail: [flower@isem.irk.ru](mailto:flower@isem.irk.ru)

## ***Development of a geographic information system to study the resilience of energy systems\****

G.K. DANILOV<sup>a</sup>, A.V. EDELEV<sup>b</sup>

Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
130 Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation

<sup>a</sup> dangleb@isem.irk.ru    <sup>b</sup> flower@isem.irk.ru

### **Abstract**

This article describes the reasons for creating a toolkit to study the energy system resilience using the capabilities of GIS technologies using the example of the Oil and Gas of Russia software package. A metamathematical model of the system and its division into main components, namely, topological and functional is described where the structural model reflects the topology of the power network in the form of a graph, and the functional model evaluates the performance taking into account both topological capabilities and functional constraints. Examples of the use of geographic information systems to aid in survivability research and the description of the requirements for developing tools for a new metamathematical model are considered. The architecture of the current "Oil and Gas of Russia" version, its features and problems that influenced the development of the new toolkit are described. The reasons for the use and features of the QT API during the development of the toolkit are given.

The new toolkit assumes the use of the Model-View-Controller architecture, which allows you to modify each component independently of the other. This architecture also helps to decouple the topological and functional components by encapsulating the topological model in the form of a separate graph, and to use a controller to communicate with the functional component. This makes it possible to use different types of functional models without the need to change the topological model. Each functional model uses its own controller which sets complex of the country as a whole.

**Keywords:** Energy system, resilience, vulnerability, geographic information system, database, graphical user interface, software and computing complex, mathematical model up its own data flow. Thus, the proposed changes to the "Oil and Gas of Russia" complex will make it possible to move in the study of resilience from modeling individual power plants to the fuel and energy

### **REFERENCES**

1. Voropai N.I., Krivorutskii L.D., Rudenko Yu.N., Sher I.A. Osnovnye metodicheskie printsipy issledovaniya i obespecheniya zhivuchesti sistem energetiki [Basic methodological principles of research and ensuring the survivability of energy systems]. *Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki* [Methods and models of research vitality energy systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, pp. 9–17.
2. Voropai N., Rehtanz C. Flexibility and resiliency of electric power systems: analysis of definitions and content. *EPJ Web of Conferences*, 2019, vol. 217, p. 1018.
3. Voropay N.I. Napravleniya i problemy transformatsii elektroenergeticheskikh sistem [Prospects and problems of electric power system transformations]. *Elektrichestvo = Electrical Technology Russia*, 2020, no. 7, pp. 12–21. (In Russian).

---

\* Received 31 May 2021.

The research was carried out under State Assignment Project no. FWEU-2021-0003 (reg. no. AAAA-A21-121012090014-5) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.CKP.21.0038).

4. Gasser P., Lustenberger P., Cinelli M., Kim W., Spada M., Burgherr P., Hirschberg S., Stojadinovic B., Sun T.Y. A review on resilience assessment of energy systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2021, vol. 6 (5), pp. 273–299.
5. Huang G., Wang J., Chen C., Guo C., Zhu B. System resilience enhancement: Smart grid and beyond. *Frontiers of Engineering Management*, 2017, vol. 4 (3), pp. 271–282.
6. Espinoza S., Panteli M., Mancarella P., Rudnick H. Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 136, pp. 352–361.
7. Roegel P.E., Collier Z.A., Mancillas J., McDonagh J.A., Linkov I. Metrics for energy resilience. *Energy Policy*, 2014, vol. 72, pp. 249–256.
8. Hussain A., Bui V.H., Kim H.M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied Energy*, 2019, vol. 240, pp. 56–72.
9. Carlson J.L., Haffenden R.A., Bassett G.W., Buehring W.A., Collins M.J. III, Folga S.M., Petit F.D., Phillips J.A., Verner D.R., Whitfield R.G. *Resilience: theory and application*. Argonne National Laboratory, ANL/DIS-12-1. Argonne, IL, 2012. 60 p.
10. Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J.E. A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 145, pp. 47–61.
11. Wan C., Yang Z., Zhang D., Yan X., Fan S. Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions. *Transport Reviews*, 2018, vol. 38 (4), pp. 479–498.
12. Bie Z., Lin Y., Li G., Li F. Battling the extreme: a study on the power system resilience. *Proceedings of the IEEE*, 2017, vol. 105, no. 7, pp. 1253–1266.
13. Sharifi A., Yamagata Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 60, pp. 1654–1677.
14. Lin Y., Bie Z., Qiu A. A review of key strategies in realizing power system resilience. *Global Energy Interconnection*, 2018, vol. 1 (1), pp. 70–78.
15. Johansson J., Hassel H. An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 2010, vol. 95 (12), pp. 1335–1344.
16. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 152, pp. 137–150.
17. Gholami A., Shekari T., Amirioun M.H., Aminifar F., Amini M.H., Sargolzaei A. Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 32035–32053.
18. Voropai N.I., Stennikov V.A., eds. *Ierarkhicheskoe modelirovanie sistem energetiki* [Hierarchical modeling of energy systems]. Novosibirsk, Geo Publ., 2020. 314 p.
19. Jufri F.H., Widiputra V., Jung J. State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies. *Applied Energy*, 2019, vol. 239, pp. 1049–1065.
20. Jonsson H., Johansson J., Johansson H. Identifying critical components in technical infrastructure networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Pt. O: Journal of Risk and Reliability*, 2008, vol. 222 (2), pp. 235–243.
21. Hausken K. Defence and attack of complex interdependent systems. *Journal of the Operational Research Society*, 2019, vol. 70 (3), pp. 364–376.
22. Mahzarnia M., Moghaddam M.P., Baboli P.T., Siano P. A review of the measures to enhance power systems resilience. *IEEE Systems Journal*, 2020, vol. 14 (3), pp. 4059–4070. DOI: 10.1109/JSYST.2020.2965993.
23. Rudenko Yu.N., ed. *Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya*. V 4 t. T. 1 [Reliability of energy systems and their equipment. Vol. 1]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1994. 480 p.
24. Sperstad I.B., Kjølle G.H., Gjerde O. A comprehensive framework for vulnerability analysis of extraordinary events in power systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, vol. 196, p. 106788.
25. Panteli M., Mancarella P. The grid: Stronger, bigger, smarter? Presenting a conceptual framework of power system resilience. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2015, vol. 13 (3), pp. 58–66.



26. Han F., Zio E. A multi-perspective framework of analysis of critical infrastructures with respect to supply service, controllability and topology. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2019, vol. 24, pp. 1–13.
27. Fang Y., Fang C., Zio E., Xie M. Resilient critical infrastructure planning under disruptions considering recovery scheduling. *IEEE Transactions on Engineering Management, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2019, vol. 68 (2), pp. 452–466.
28. Ouyang M., Fang Y. A mathematical framework to optimize critical infrastructure resilience against intentional attacks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, vol. 32 (11), pp. 909–929.
29. Fang Y., Zio E. Resilience management of infrastructure systems from a multistage decision making perspective. *29th European Safety and Reliability Conference (ESREL2019)*, Hannover, Germany, 2019, pp. 3382–3389. DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3.
30. Edelev A.V., Zorkaltsev V.I. An algorithm for determining optimal and suboptimal trajectories of the development of a system. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2019, vol. 13 (1), pp. 36–42.
31. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V., Kostromin R.O., Sidorov I.A., Feoktistov A.G., E.S. Fereferov A.G., Fedorov R.K. Support for managing the survivability of energy systems based on a combinatorial approach. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2021, vol. 60, no. 6, pp. 981–994. Translated from *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2021, no. 6, pp. 122–135.
32. Edelev A.V., Senderov S.M., Pyatkova N.I. Primenenie geoinformatsionnykh tekhnologii dlya issledovaniya problem energeticheskoi bezopasnosti [Application of geoinformation technologies for the study of energy security problems]. *Problemy upravleniya = Control Sciences*, 2015, no. 2, pp. 68–74.
33. Scholz Y. *Renewable energy based electricity supply at low costs: development of the remix model and application for Europe*: PhD Dissertation. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart, 2012. 181 p. Available at: [http://elib.dlr.de/77976/1/REMix\\_Thesis\\_YS.pdf](http://elib.dlr.de/77976/1/REMix_Thesis_YS.pdf) (accessed 11.02.2022).
34. Edelev A., Fereferov E.S. A software platform to support the energy system resilience study. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol. 2638, pp. 79–88.
35. Edelev A.V., Fereferov E.S., Khmel'nov A.E. Workbench for vulnerability analysis of Vietnam energy sector. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol. 2677, pp. 23–35.
36. Vorob'ev S.V., Edelev A.V. Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya pri raspredelenii izlishkov gaza v Edinoi sisteme gazosnabzheniya Rossii [Features of mathematical modeling in the distribution of natural gas excess in the Russian Unified Gas Supply System]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 62, pp. 181–194. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-181-194.
37. Klimenko S.M., Senderov S.M., Yanchenko V.A. Issledovanie problem povysheniya ustoichivosti i ekologicheskoi bezopasnosti magistral'nykh nefte- i nefteproduktoprovodov [Study of the problems of increasing the sustainability and environmental safety of oil and oil product pipelines]. *Novye informatsionnye tekhnologii upravleniya razvitiem i funktsionirovaniem truboprovodnykh sistem energetiki* [New information technologies for managing the development and functioning of energy pipeline systems]. Irkutsk, SEI SB RAS Publ., 1993, pp. 119–127.
38. Edelev A.V., Senderov S.M. [Integrated instrumental environment PVK "Oil and Gas of Russia"]. *Informatsionnye tekhnologii v energetike: sovremennye podkhody k analizu i obrabotke informatsii: trudy Vserossiiskogo seminar* [Proceedings of the All-Russian Seminar "Information technology in energy: modern approaches to the analysis and processing of information"]. Irkutsk, 2000, pp. 165–169. (In Russian).
39. Booch G., Maksimchuk R.A., Engle M.W., Young B.J., Conallen J., Houston K.A. *Object-oriented analysis and design with application*. 3rd ed. Addison-Wesley, 2007 (Russ. ed.: *Ob"ektno-orientirovannyi analiz i proektirovanie s primerami prilozhenii*. 3rd ed. Moscow, Williams, 2008. 720 p.).
40. *The Software Architecture Chronicles*. Available at: <https://herber-tograca.com/2017/07/03/the-software-architecture-chronicles/> (accessed 17.02.2022).

41. McConnell S. *Code complete*. 2nd ed. Redmond, WA, Microsoft Press, 2004. 960 p.
42. Baranov V. *Ierarkhiya printsiptov proektirovaniya, ili samye vazhnye slova dlya inzhenerov* [Hierarchy of design principles, or the most important words for engineers]. Available at: <https://habr.com/ru/post/169487/> (accessed 17.02.2022).
43. Raymond E.S. The Unix philosophy in one lesson. Raymond E.S. *The Art of Unix Programming*. Addison-Wesley, 2003. ISBN 0-13-142901-9.
44. Hunt A., Thomas D. *The pragmatic programmer: from journeyman to master*. 1st ed. Reading, MA, Addison-Wesley, 1999. 320 p. ISBN 978-0201616224.
45. Pereverza D. *TDDx2, BDD, DDD, FDD, MDD i PDD, ili vse, chto vy khotite uznat' o Driven Development* [TDDx2, BDD, DDD, FDD, MDD and PDD, or whatever you want to know about Driven Development]. Available at: <https://habr.com/ru/post/459620> (accessed 17.02.2022).
46. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J.M. *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1995. 395 p.
47. Rogachev S. *Obobshchennyi Model-View-Controller* [Generalized Model-View-Controller]. Available at: <http://rdsn.org/article/patterns/generic-mvc.xml> (accessed 17.02.2022).
48. Martin R.C. *Agile software development: principles, patterns, and practices*. With contrib. by J.W. Newkirk, R.S. Koss. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2002 (Russ. ed.: Martin R.K., N'yukirk D.V., Koss R.S. *Bystraya razrabotka programm: printsipy, primery, praktika*. Moscow, Williams Publ., 2004. 744 p.).

Для цитирования:

Данилов Г.К., Еделев А.В. Разработка геоинформационной системы для исследования живучести систем энергетики // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 41–58. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-41-58.

For citation:

Danilov G.K., Edelev A.V. Razrabotka geoinformatsionnoi sistemy dlya issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki [Development of a geographic information system to study the resilience of energy systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 41–58. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-41-58.