

Создание моделей систем энергетики на основе открытых данных для исследования их живучести

Алексей Еделев^{1,2}, Глеб Данилов², Ольга Башарина^{1,3}, Евгений Фереферов¹, Татьяна Фер³

¹ Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, ул. Лермонтова, д. 134, 664033, Иркутск, Россия

² Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, ул. Лермонтова, д. 130, 664033, Иркутск, Россия

³ Уральский государственный экономический университет, ул. 8 марта, д. 62, 620144, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Существенным недостатком моделей отраслевых систем энергетики, предназначенных для исследований живучести систем газоснабжения, нефте- и нефтепродуктоснабжения является их статичность, что делает указанные модели пригодными только для исследований одной из сторон живучести систем энергетики – адаптации системы к возмущению. Для ухода от статичности и связанных с нею проблем в исследованиях живучести систем энергетики необходима разработка многопериодных потоковых моделей, которые позволят более реалистично и точно представлять функционирование систем энергетики в экстремальных условиях. В данной статье приводятся результаты первой части процесса разработки модели системы газоснабжения Европейского союза на основе открытых данных: создание БД для хранения структуры системы газоснабжения и построение посуточных графиков потребления газа.

Ключевые слова

системы энергетики, живучесть, открытые данные

1. Введение

Системы энергетики (СЭ) предназначены для добычи (производства, получения), переработки (преобразования), передачи (транспортирования), хранения и распределения энергоресурсов и снабжения ими потребителей [1]. Они относятся к критическим инфраструктурам, под которыми понимаются системы, нарушение функционирования которых отрицательно влияет на экономику государства и благополучие общества [2].

В основе функционирования и развития СЭ лежат требования надёжности, позволяющие данным системам справляться с уже известными возмущениями, вероятность возникновения которых высока, а по масштабу последствий их можно характеризовать как мелкие и средние. Однако, в настоящее время резко вырос интерес к исследованию способности СЭ выживать при столкновении с крупными возмущениями [3], вероятность возникновения которых весьма мала или достоверно неизвестна, а их воздействие может привести к тому, что СЭ без дополнительных мер не сможет далее выполнять возложенные на неё функции. При этом изучается реакция СЭ на наступление таких экстремальных условий, последствия для потребителей, компенсация нежелательных последствий [4] и процесс восстановления системы [5].

Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments: Practice and Experience

EMAIL: flower@isem.irk.ru (A. 1); dangleb@isem.irk.ru (A. 2); basharinaolga@mail.com (A. 3); fereferov@icc.ru (A. 4); tatiana.fer@yandex.ru (A. 5)

ORCID: 0000-0003-2219-9754 (A. 1); 0000-0002-7151-782X (A. 3); 0000-0002-7316-444X (A. 4)



© 2024 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

DOI:10.47350/ICCS-DE-PE.2024.02

Данная способность СЭ противостоять крупным возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением режима энергоснабжения потребителей [6], и восстанавливать исходное состояние объекта или близкое к нему, называется живучестью [7, 8]. Главной целью исследования живучести является построение стратегий управления развитием и функционирования СЭ, которые позволяют эффективно адаптироваться к крупным возмущениям и восстанавливаться после них.

Современные исследования живучести СЭ строятся на отслеживании и сравнении изменений показателя системной производительности P до и после крупного возмущения. Временной ряд со значениями P называется кривой живучести. Графическое представление кривой живучести показано на рис. 1.

На рис. 1 с момента t_0 до момента t_1 система находится в исходном стабильном состоянии, которое характеризуется уровнем производительности P_2 . Крупное возмущение возникает в момент t_1 . Система сопротивляется процессу деградации, сначала пытаясь поглотить возмущение, а затем противодействует ему. Где-то в момент t_2 возмущение заканчивается падением системной производительности до значения P_0 . В период времени с t_2 до t_3 система приспосабливается к последствиям. Начиная с момента t_3 , система стремится в кратчайшие сроки восстановить свою производительность. В момент t_4 процесс восстановления заканчивается, и система приходит в новое стабильное состояние. Далее она продолжает медленно увеличивать свою производительность до одного из приемлемых уровней P_1 , P_2 или P_3 к моменту T [9-11].

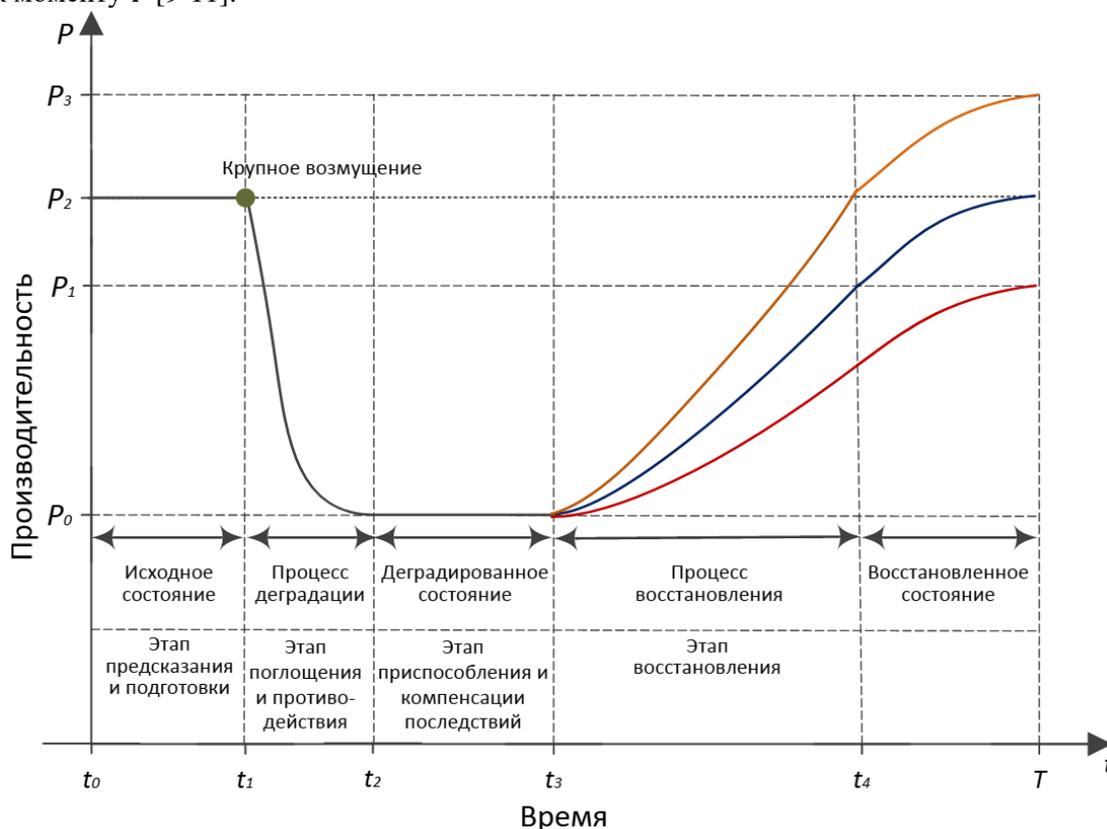


Рисунок 1: Идеализированная кривая живучести СЭ

Говоря формально, состояние СЭ в момент времени $t = t_0, \dots, T$ описывается вектором x , в состав которого входят структурные и режимные параметры объектов энергетики, а также природно-климатические, социальные, экономические и прочие параметры, представляющие условия внешней среды. Если X это последовательность состояний СЭ $\{x^{t_0}, \dots, x^T\}$, то показатель производительности является функцией $P(t): X \rightarrow \mathbb{R}$, преобразующей x^t в скалярную величину. Поведение СЭ на определённом интервале времени характеризуется сводной метрикой $D: P \rightarrow \mathbb{R}$, которая сворачивает участок кривой живучести на рассматриваемом интервале времени в скалярную величину [12].

Если показатели производительности отражают по большей части технологические или территориальные особенности СЭ, то сводные метрики характеризуют в количественном виде стороны живучести [13], отражающие различные временные этапы поведения СЭ в экстремальных условиях функционирования: планирование, сопротивление, подстройка и восстановление (рис. 1). Первые три стороны соответствуют первой составляющей определения живучести – адаптации системы к возмущению, а последняя сторона соответствует второй составляющей определения живучести – восстановлению системы после возмущения.

Планирование характеризует способность СЭ предсказывать крупные возмущения и готовиться к ним на интервале времени (t_0, t_1) кривой живучести (рис. 1). Сопротивление представляет способность СЭ поглощать зарождающееся возмущение и далее противостоять ему на интервале (t_1, t_2) . Подстройка характеризует способность СЭ приспособиться к изменениям, вызванным воздействием возмущения, и компенсировать его последствия на интервале (t_2, t_3) . Восстановление характеризует быстроту, с которой СЭ может вернуться к выполнению своих функций на заданном уровне на интервале времени (t_3, t_4) .

В табл. 1 приведены простые сводные метрики [14, 15]. Например, интегральная характеристика живучести Ω рассчитывает нормализованную величину непокрытой нагрузки СЭ на протяжении всего времени выживания. Значения данной метрики лежат в пределах отрезка $[0, 1]$, где 0 представляет абсолютно неживучую систему, а 1 – полностью живучую систему [16].

Таблица 1
Простые сводные метрики

Характеризуемая сторона живучести СЭ	Наименование метрики	Формула
Сопротивление	Скорость падения производительности СЭ	$\Phi = \frac{P(t_1) - P(t_2)}{t_2 - t_1}$
Подстройка	Уязвимость СЭ	$\Lambda = P(t_1) - P(t_2)$
Восстановление	Время приспособления СЭ к последствиям крупного возмущения	$E = t_3 - t_2$
Вся живучесть	Скорость восстановления СЭ	$\Pi = \frac{P(t_4) - P(t_3)}{t_4 - t_3}$

Данная статья посвящена решению проблемы создания на основе открытых данных новых моделей отраслевых СЭ для исследований их живучести, общая методика проведения которых приводится ниже.

2. Методика проведения исследований живучести СЭ

Как было сказано выше, отправной точкой в современных исследованиях живучести СЭ являются источники (механизмы генерации) временных рядов данных, представляющих состояния системы в последовательные моменты времени сценария крупного возмущения [12, 17]. Данные источники могут варьироваться в широких пределах: исторические данные, натурные опыты, агентное и имитационное моделирование системной динамики [18], искусственные нейронные сети [19], сетевые потоковые методы [20]. К последним относятся потоковые модели СЭ [21], которые можно записать в следующем общем виде:

$$\min_x C(X), \quad (1)$$

$$g_i(X) \leq 0, i = 1, \dots, I \quad (2)$$

$$h_j(X) = 0, j = 1, \dots, J \quad (3)$$

где X – искомая последовательность состояний СЭ, C – функция экономических затрат. Неравенства g_i в количестве I из (2) и равенства h_j в количестве J из (3) представляют разнообразные требования к функционированию и развитию СЭ.

Переход к оценке возможностей СЭ по адаптации к конкретному крупному возмущению \hat{v} происходит путём добавления в модель (1)-(3) вектора критериев живучести F [22]:

$$\min_{X \in S(\hat{v})} R(X, \hat{v}) = (C(X, \hat{v}), F(X, \hat{v})), \quad (4)$$

где S – множество допустимых планов распределения потоков энергоресурсов в условиях, определяемых ограничениями (2), (3) и воздействием возмущения \hat{v} . Критерии F должны использовать сводные метрики D для оценки живучести СЭ.

Параметризируя \hat{v} в (2), получается двухуровневая постановка для поиска наихудшего сценария возмущения из множества крупных возмущений V [23]:

$$\max_{v \in V} \min_{X \in S(v)} R(X, v). \quad (5)$$

Аналогичным способом можно получить трехуровневую постановку для выбора наилучших мер по повышению живучести СЭ из множества W при реализации наихудшего возмущения из множества V [24]:

$$\min_{w \in W} \max_{v \in V} \min_{X \in S(v, w)} R(X, v, w), \quad (6)$$

где S – множество допустимых планов распределения потоков энергоресурсов в условиях реализации возмущения $v \in V$ и меры по повышению живучести $w \in W$.

Вышеописанный процесс преобразования математической постановки (1) в (4) образует схему итеративного построения исследований живучести СЭ. Данная схема имеет чисто формальный характер и не отображает подробности исследований живучести определённых СЭ. Однако эта схема даёт возможность взглянуть на структуру исследований живучести глобально и правильно классифицировать задачи данной предметной области, соответствующие различным модификациям математических постановок (4)-(6). Понимание того, как строится иерархия классов задач, что является входом и выходом для каждого класса сильно облегчает организацию вычислительных экспериментов, которые являются основным средством проведения исследований живучести больших СЭ вследствие невозможности проведения натуральных опытов на них [1, 4].

Организацией и проведением вычислительных экспериментов занимается предметно-ориентированная среда (ПОС), под которой понимается совокупность программно-аппаратных средств, позволяющих её конечным пользователям решать один или несколько определённых классов задач некоторой предметной области [25]. В данном случае предметная область характеризуется следующими особенностями [26]:

- структурная и динамическая сложность СЭ;
- разные типы взаимосвязей между системными компонентами;
- учёт неопределённости данных вследствие функционирования СЭ в экстремальных условиях;
- многокритериальность задач исследований живучести;
- отсутствие жёсткой привязки к структуре и составу моделей СЭ;
- наличие слабоструктурированных исходных данных и неформализуемых знаний об изучаемых системах.
- ПОС, описанная в работах [22, 27, 28], учитывает перечисленные особенности исследований живучести СЭ и отображает представленную выше схему построения исследований живучести на вычислительные инфраструктуры с помощью разработанных в ИДСТУ СО РАН ряда инструментов и технологий их применения.

В число основных разработок, используемых для данного класса задач, входят распределённые пакеты прикладных программ (РППП), предназначенные для решения определённого класса задач разнообразных предметных областей, включая живучесть СЭ [17, 29, 30]; инструментарий ГеоАРМ [31] для создания автоматизированных рабочих мест, которые позволяют исследователю работать с исходными данными, включая слабоструктурированные, взаимодействовать с РППП, анализировать результаты вычислительных экспериментов.

Архитектура типового РППП для исследования живучести СЭ обеспечивает:

- универсальный протокол взаимодействия со всей территориально-отраслевой иерархией энергетических моделей (1) [32];

- механизм объединения различных моделей отдельных систем энергетики для исследования их совместной работы в экстремальных условиях [32];
- отображение крупных возмущений на модель СЭ путём моделирования отказов и восстановлений отдельных элементов системы [17];
- разделение крупных возмущений по типу воздействию на структурные и функциональные [29];
- моделирование каскадного развития аварий, в том числе их распространения по взаимосвязанным системам.

Всё вышесказанное можно суммировать в виде методики проведения исследований живучести СЭ, которая состоит из следующих шагов:

1. Подбор готовой или создание новой модели вида (1)-(3) под изучаемую проблему живучести СЭ.
2. Разбивка изучаемой проблемы живучести СЭ на задачи таким образом, чтобы каждой задаче можно было сопоставить соответствующей ей класс из постановок (4)-(6).
3. Для решения каждой задачи, выделенной на шаге 2, необходимо выполнить операции:
 - a. Наполнение постановки из (4)-(6), исходя из особенностей поставленной задачи и модели СЭ.
 - b. Выбор показателей системной производительности P и сводных метрик D , отражающих суть поставленной задачи и подходящих к модели заданной СЭ.
 - c. Подбор или создание вычислительных схем для решения поставленной задачи.
 - d. Проверка существования РППП для класса поставленной задачи и выбранные или созданные вычислительные схемы, разработка и реализация новых РППП при необходимости.
 - e. Формирование декларативной спецификации и создание АРМ при необходимости.
 - f. Организация и проведение вычислительных экспериментов с помощью ПОС для исследований живучести СЭ.
4. Анализ и объединение результатов вычислительных экспериментов для дальнейшего формирования окончательных выводов по изучаемой проблеме живучести СЭ.

2.1. Особенности моделирования отраслевых СЭ

Вышеперечисленные возможности архитектуры типового РППП для исследований живучести СЭ обеспечиваются благодаря тому, что в основе архитектуры лежит обобщённый подход к моделированию взаимосвязанных технических систем [33, 34]. Последний, в свою очередь, основан на следующих принципах [23, 32]:

- явное разделение моделирования любой системы на топологическую и функциональную составляющую;
- представление взаимосвязанных систем в виде метасистемы для моделирования их взаимодействия.

Согласно первому принципу, структурная модель отраслевой СЭ представляет собой сеть или направленный граф $G = (N, E)$, где N – это множество, состоящее из $n = |N|$ узлов, E – это множество, состоящее из $m = |E|$ дуг.

Множество узлов N делится на следующие подмножества: источники N_b , потребители N_d , промежуточные узлы N_o и хранилища N_c . Узлы могут быть выделенными реальными источниками, хранилищами или потребителями энергоресурсов. Однако чаще всего они представляют собой агрегированные группы объектов, которые имеют сходную функциональность, достаточно однородны по своим характеристикам или располагаются в одном районе. Все узлы имеют географические координаты.

Для каждой дуги $(i, j) \in E$ узел $i \in N$ является началом, а узел $j \in N$ – концом. Также как в случае с узлами, дуги могут являться настоящими объектами транспорта, но в большинстве случаев они представляют собой агрегированные производственные возможности по передаче энергоресурсов.

Функциональная модель отраслевой СЭ описывает технологические цепочки от производства (добычи) до потребления отдельных видов энергоресурсов и может быть записана в виде следующей задачи линейного программирования [35]:

$$c^T x \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$Ax = r, \quad (8)$$

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \quad (9)$$

где c – вектор удельных затрат по технологическим способам функционирования действующих, реконструируемых или модернизируемых, а также вновь сооружаемых энергетических объектов; A – матрица технологических коэффициентов производства (добычи), переработки, транспорта, хранения и потребления энергоресурсов; x – искомый вектор, который, как следует из введения, характеризует интенсивность применения технологических способов функционирования энергетических объектов; \bar{x} – вектор, определяющий максимальные технически возможные интенсивности применения технологических способов функционирования энергетических объектов; \underline{x} – вектор, определяющий минимально технически требуемые интенсивности применения технологических способов функционирования энергетических объектов; r – вектор, задающий максимально возможные объёмы производства (отрицательные компоненты) и потребления энергоресурсов (положительные компоненты).

С каждой дугой $(i, j) \in E$ связаны следующие параметры (рис. 2):

- нижний предел пропускной способности \underline{x}_{ij} , которая может быть равна нулю;
- верхний предел пропускной способности \bar{x}_{ij} ;
- удельные затраты (стоимость передачи единицы потока) c_{ij} , являющиеся коэффициентом целевой функции (7);
- каждый столбец матрицы A , связанный с дугой $(i, j) \in E$, должен содержать не более двух ненулевых компонент с противоположными знаками: один коэффициент обычно равен -1 , а другой является положительным множителем η_{ij} .

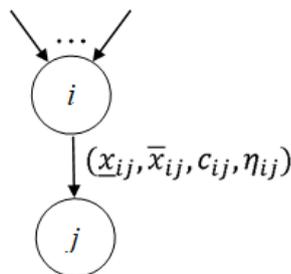


Рисунок 2: Представление объектов транспорта, хранения и преобразования энергоресурса

Коэффициент η_{ij} характеризует эффективность процесса передачи энергоресурса по дуге $(i, j) \in E$. Это означает, что если из начального узла $i \in N$ выходит одна единица энергоресурса, то в конечный узел $j \in N$ поступает η_{ij} единиц [35, 36]. При моделировании отраслевой СЭ η_{ij} отражает потери энергоресурса в объекте транспорта или хранения, поэтому выполняется условие $0 \leq \eta_{ij} \leq 1$.

Говоря в целом, задача (7)–(9) находит поток минимальной стоимости по сети G . Если η_{ij} равен 1 для всех дуг $(i, j) \in E$ (каждый столбец матрицы A содержит только -1 и/или $+1$), то сеть G называется простой. Если η_{ij} не равен 1 хотя бы для одной дуги $(i, j) \in E$, то сеть G называется обобщенной.

Хорошо известно, что методы решения задач (7)–(9) для простых сетей [37] существенно более эффективны в вычислительном плане и, соответственно, намного быстрее, чем для обобщенных сетей [38, 39]. Если ранг матрицы A равен $n-1$, то любая обобщенная сеть может быть преобразована в простую с помощью специальных процедур масштабирования [40, 41]. В противном случае, если потери энергоресурсов при передаче довольно малы или удельные

расходы при преобразовании близки к единице, то для повышения скорости решения потоковых задач множителями η_{ij} можно пренебречь, то есть считать их равными 1 [42].

Перечисленные ухищрения используются в моделях отраслевых СЭ [44, 45], предназначенных для исследований живучести систем газоснабжения, нефте- и нефтепродуктоснабжения. Существенным недостатком данных моделей является их статичность, следствиями которой являются:

- отсутствие динамики, не позволяющее использовать модели в полной мере в современных исследованиях, построенных на анализе кривых живучести (рис. 1);
- упрощенное моделирование экстремальных условий функционирования СЭ в виде неизменно постоянной пиковой потребности в энергоресурсах.

Первое следствие статичности вышеуказанных моделей отраслевых СЭ делает указанные модели пригодными только для части исследований живучести СЭ, а именно для анализа уязвимости систем [2, 46], который играет центральную роль в поддержке принятия решений по повышению живучести. Различные виды анализа уязвимости СЭ, наиболее популярным из которых является поиск критических элементов [23, 30, 33], могут быть в целом описаны как следующая разновидность постановки (5)

$$\max_{v \in V} \min_{X \in S(v)} \Lambda(X, v), \quad (10)$$

где метрика Λ (см. табл. 1) отвечает за определение максимального падения производительности вследствие воздействия крупного возмущения $v \in V$.

Исходя из табл. 1, для расчёта Λ необходима последовательность $X = \{x^{t_1}, x^{t_2}\}$, где согласно кривой живучести на рис. 1 в момент t_1 СЭ находится в исходном стабильном состоянии с производительностью P_2 , а в момент t_2 какое-либо крупное возмущение v заканчивается падением производительности СЭ до некоего наименьшего значения P_0 . Значение производительности P_2 рассчитывается один раз для всех возмущений $v \in V$. Следовательно, генерации только одного состояния СЭ в момент t_2 достаточно для определения максимального падения производительности.

Второе следствие вышеуказанных моделей отраслевых СЭ в отношении анализа уязвимости СЭ в постановке (10) может привести к недопустимому завышению значений сводной метрики Λ [47].

Следует отметить то, что в последнее время в литературе постановка анализа уязвимости постепенно меняется с (10) на следующую:

$$\max_{v \in V} \min_{X \in S(v)} \Omega(X, v), \quad (11)$$

где Ω – сводные метрики (см. табл. 1), которые рассчитывает нормализованную величину непокрытой нагрузки на протяжении всего периода времени выживания СЭ $[t_1, \dots, T]$.

Если же подходить к исследованиям живучести СЭ в целом, то они по представленной выше методике могут проводиться с использованием сводной метрики Λ . Это, с одной стороны, по аналогии с рассуждениями об анализе уязвимости упрощает требования к моделям СЭ и сокращает время проведения соответствующих вычислительных экспериментов. С другой стороны, использование какой-либо одной простой сводной метрики приводит к более глобальной проблеме, существующей в настоящее время в исследованиях живучести СЭ. Она заключается в том, что большинство подходов в этой научной области фокусируются на детальном рассмотрении только одной из двух составляющих определения живучести [18, 48, 49]. Согласно работам [50, 51], стратегии, полностью ориентированные на усиление адаптации системы к крупному возмущению, менее эффективны по сводной метрике Ω , чем стратегии, повышающие живучесть СЭ на всём периоде выживания $[t_1, \dots, T]$, при равных экономических затратах.

Для ухода от статичности и связанных с нею проблем в исследованиях живучести СЭ необходимы многопериодные потоковые модели, которые формируются как набор копий простой или обобщённой сети G , по одной на каждый момент времени $t = t_0, \dots, T$. Эти копии связываются между собой дугами, которые передают величину запасов энергоресурсов в хранилищах из одного периода времени в другой. Такой подход используется в уже реализованной авторами модели энергетического комплекса [17] на базе концепции энергетического хаба [52-55].

Новые функциональные модели систем газоснабжения, нефте- и нефтепродуктоснабжения позволяют более реалистично и точно моделировать функционирование этих СЭ в экстремальных условиях. Например, падение давления газа вследствие воздействия крупного возмущения на газотранспортную сеть, может сказываться на ближайших к месту аварии потребителях через несколько часов, а на наиболее удалённых – через сутки и более. Также новые модели позволят исследовать зависимость системной производительности от непостоянства нагрузки и вариативности технических характеристик оборудования СЭ во время крупного возмущения и после него. Последнее даст возможность снизить влияние перечисленных и прочих факторов неопределённости, учёт которых является неотъемлемой частью исследований живучести, на процесс принятия решений по повышению живучести СЭ [56-58].

2.2. Открытые данные для энергетических исследований

Открытость данных играет важную роль в разработке новых численных методов, так как для сравнения их эффективности с другими подобными методами требуются четко определенные, реалистичные тестовые задачи [60]. Примерами библиотек эталонных тестов, широко используемых в численной оптимизации, являются MINLPLib [61] и MIPLIB [62]. В сфере энергетики усилия в данном направлении направлены на разработку [63]:

- программных платформ с открытым исходным кодом для оптимизации СЭ [64], например, Temoa [65] с линейной эталонной моделью Utopia [66];
- открытых источников информации, содержащих массивы данных по энергетике страны [67-69] или полные спецификации электростанций [70];
- общедоступных коллекций эталонных схем конкретных СЭ [71, 72].

Если перейти к системам газоснабжения, то коллекция газотранспортных сетей GasLib [73] широко применяется различных исследованиях систем газоснабжения, включая их живучесть [74]. В качестве известных открытых источников информации можно привести работу [75] с описанием системы газоснабжения Бельгии. Результатом 3-хлетнего проекта SciGRID_gas, выполненного в Ольденбургском институте сетевых энергетических систем, стали выложенные в открытый доступ массивы данных по системе газоснабжения Европейского союза [76].

2.3. Создание модели системы газоснабжения на основе данных проекта SciGRID_gas

Для классификаций территорий в государствах - членах Европейского союза применяются иерархическая система NUTS (номенклатура территориальных статистических единиц), состоящая из следующих уровней [77]:

- NUTS-0: национальный уровень, первые две цифры кода NUTS (например, DE обозначает Германию);
- NUTS-1: федеральный уровень, первые три цифры кода NUTS (например, DEA обозначает федеральную землю Северный Рейн-Вестфалия);
- NUTS-2: административные округа, первые четыре цифры кода NUTS (например, DEA2 обозначает административный округ Кельн);
- NUTS-3: районы и города без районов, пять цифр кода NUTS (например, DEA22 обозначает город Бонн).

В рамках проекта SciGRID_gas агрегирование информации по потреблению газа осуществлялось по уровням NUTS-1, NUTS-2 и NUTS-3, в результате чего были получены соответствующие этим уровням массивы данных по системе газоснабжения Европейского союза: IGGIELGNC-1 [78], IGGIELGNC-2 [79] и IGGIELGNC-3 [80].

В массивах данных SciGRID_gas выделяются четыре типа объектов ЭС: объекты добычи, объекты магистрального транспорта, объекты подземного хранения и объекты потребления [81]. К объектам добычи можно условно отнести все объекты, выдающие газ в сеть магистрального транспорта, в том числе месторождения, терминалы сжиженного природного газа (СПГ) и подземные хранилища газа (ПХГ), если рассматриваемый момент времени совпадает со

временем отбора газа из ПХГ. К объектам магистрального транспорта газа относятся участки магистральных газопроводов (МГ), включающие линейную часть и компрессорные станции (КС), расположенные на ней, а также пограничные пункты для измерения объёмов газа, перемещаемого между странами. К объектам потребления продукции относятся группы потребителей, осуществляющих отбор газа из магистральных газопроводов в точках подключения к ним распределительных газопроводов, электростанции, работающие на газе, и ПХГ, если рассматриваемый момент совпадает с периодом закачки газа в ПХГ. Группы потребителей газа включают домашние хозяйства, промышленные предприятия и коммерческие объекты.

Каждый из трёх массивов данных, полученных в рамках проекта SciGRID_gas, представляет собой набор текстовых файлов, содержащих список атрибутов объектов ЭС различных типов, выделенных выше, и сами значения атрибутов. Из этого следует, что массивы IGGIELGNC-1, IGGIELGNC-2 и IGGIELGNC-3 представляют собой источники слабоструктурированных данных, которые для дальнейшей работы были преобразованы в реляционную БД с помощью инструментария ГеоАРМ [31].

Инфологическая модель БД, полученная в результате работы по преобразованию данных, является универсальной для всех трёх массивов и в усечённом виде показана на рис. 3. Если не принимать во внимание виртуальные вычисляемые поля, то структура главных таблиц БД SciGRID_gas единообразна (табл. 2). Назначение вычисляемых полей каждой таблицы даётся ниже вместе с её описанием.

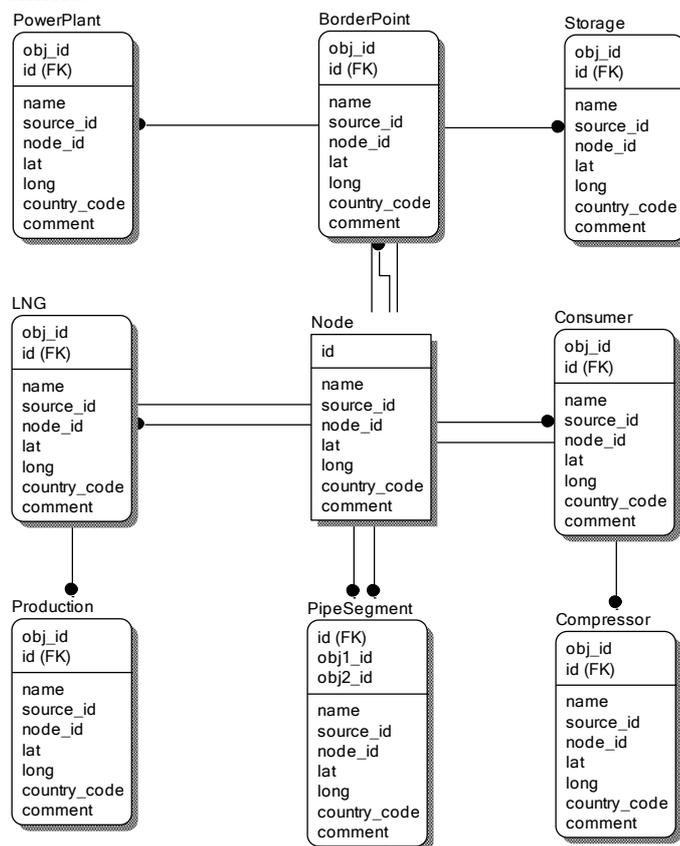


Рисунок 3: Взаимосвязи главных таблиц БД SciGRID_gas

Структурная модель СЭ, как описано выше, представляет собой направленный граф $G = (N, E)$. Множеству узлов N соответствует таблица-справочник Node (рис. 3), в которой код узла $a \in N$ представлен полем id (табл. 2), а поля lat (широта) и $long$ (долгота) определяют географические координаты этого узла. Значения полей lat и $long$ заданы в проекции World Geodetic 1984 (код epsg 4326). Таким образом, таблица Node является справочником, с помощью которого будут осуществляться операция геокодирования объектов ЭС, другими словами, привязка атрибутов объектов ЭС к географическим координатам на электронной карте.

Таблица 2

Структура главных таблиц БД SciGRID_gas

Название поля	Тип поля	Описание
id	Строка	Уникальный идентификатор объекта ЭС
name	Строка	Название объекта, например, "Compressor Radeland"
source_id	Строка	Список кодов источников исходных данных об объекте ЭС
node_id	Строка	Список кодов узлов множества N . Для участков МГ список состоит из кодов начального и конечного узла, для прочих объектов ЭС список содержит только один код узла
lat	Строка	Список широт объекта ЭС аналогично полю node_id
long	Строка	Список долгот объекта ЭС аналогично полю node_id
country_code	Строка	Двузначный код страны в формате ISO
comment	Строка	Произвольный комментарий, связанный с объектом ЭС. В большинстве случаев не указывается

Множеству дуг E соответствует таблица-справочник PipeSegment (рис. 3), в которой вычисляемые поля obj1_id и obj2_id хранят коды узла-начала $i \in N$ и узла-конца $j \in N$ дуги $(i, j) \in E$, соответственно. Поля obj1_id и obj2_id являются внешними ключами, связанными с полем id таблицы Node. Значения полей obj1_id и obj2_id извлекаются из строкового поля node_id (табл. 2).

Таблица PipeSegment может содержать несколько записей с одинаковыми парами ключей obj1_id и obj2_id. Эти записи будут иметь уникальные значения поля id и соответствовать участкам МГ с совпадающими началами и концами, которые далее могут быть объединены в так называемые коридоры.

Таблицы-справочники КС (Compressor), пограничных пунктов (BorderPoint) на рис. 3 в совокупности формируют подмножество промежуточных узлов N_o . Подмножество узлов-источников N_b представляют таблицы терминалов СПГ (LNG) и месторождений газа (Production), подмножество узлов-потребителей N_d – таблицы электростанций (PowerPlant) и потребителей газа (Consumer) и, а таблица ПХГ (Storage) содержит подмножество узлов-хранилищ N_c . В перечисленных таблицах значение вычисляемого поля obj_id извлекается из строкового поля node_id (табл. 2), а поля lat и long копируют одноимённые поля из таблицы Node. Как и в случае с таблицей PipeSegment, может существовать несколько объектов СЭ из подмножеств N_b , N_d , N_c и N_o с одинаковым obj_id, однако значение поля id у этих объектов будет уникальным в пределах БД SciGRID_gas.

Помимо атрибутов объектов СЭ, представленных в табл. 2, набор исходных файлов SciGRID_gas также хранит в себе три дополнительных строковых атрибута param, method и uncertainty, значения которых представляют массивы данных в формате JSON. Разворачивание этих массивов данных даёт три добавочные таблицы, структура которых зависит от типа объекта СЭ (рис. 4-11).

Как видно из рис. 4-11, дополнительные таблицы связаны с соответствующей главной таблицей ключевым полем id (табл. 2), однозначно идентифицирующим объект СЭ в пределах БД SciGRID_gas. Также, из анализа структуры дополнительных таблиц можно сделать вывод, что информация, необходимая для построения многопериодных функциональных моделей, хранится в атрибуте param.

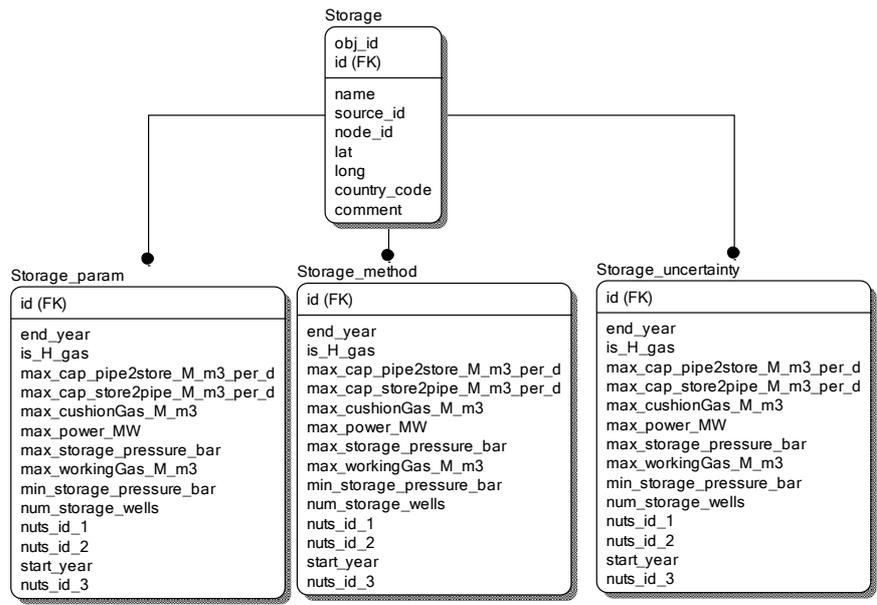


Рисунок 4: Атрибуты ПХГ

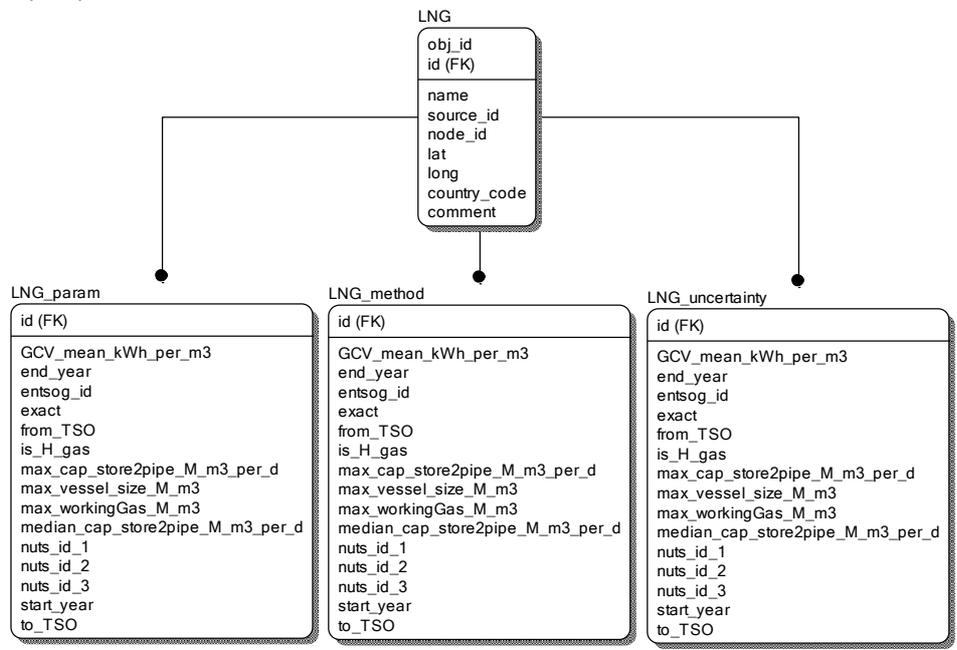


Рисунок 5: Атрибуты терминала СПГ

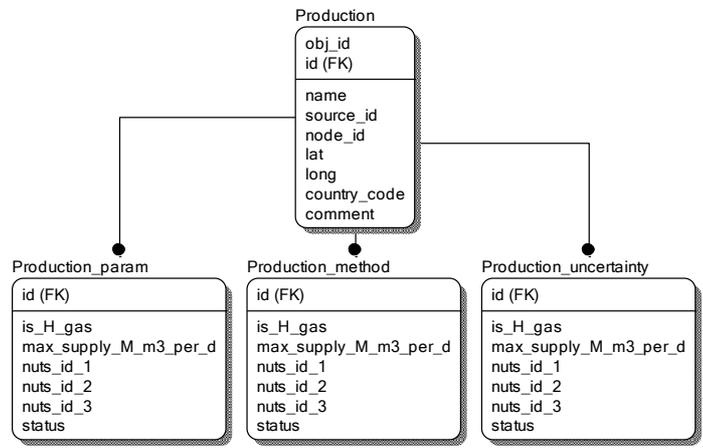


Рисунок 6: Атрибуты месторождения газа

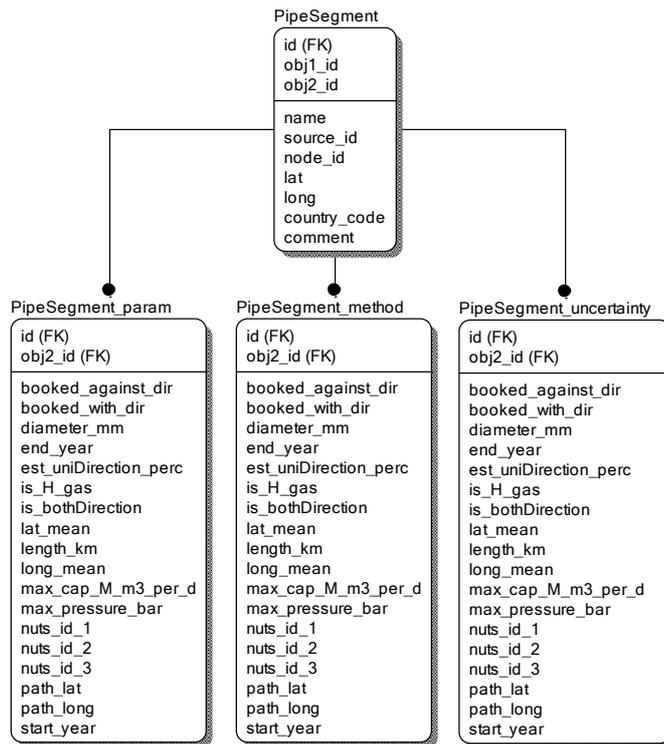


Рисунок 7: Атрибуты участка МГ

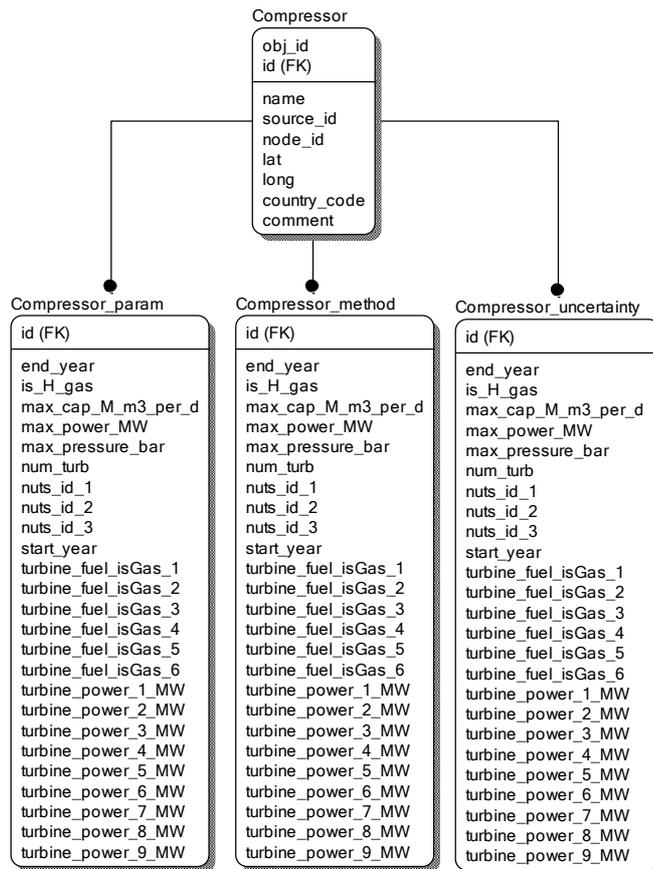


Рисунок 8: Атрибуты КС

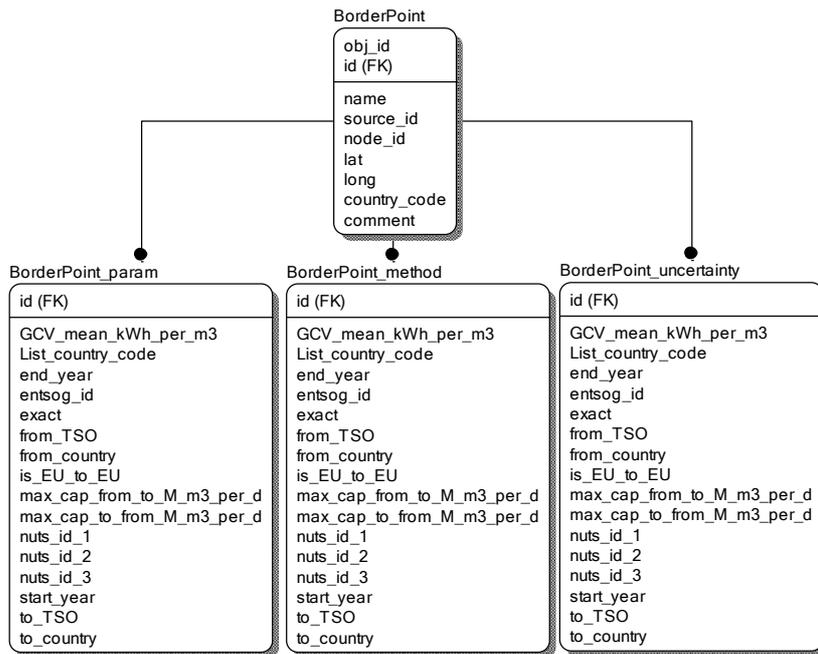


Рисунок 9: Атрибуты пограничного пункта

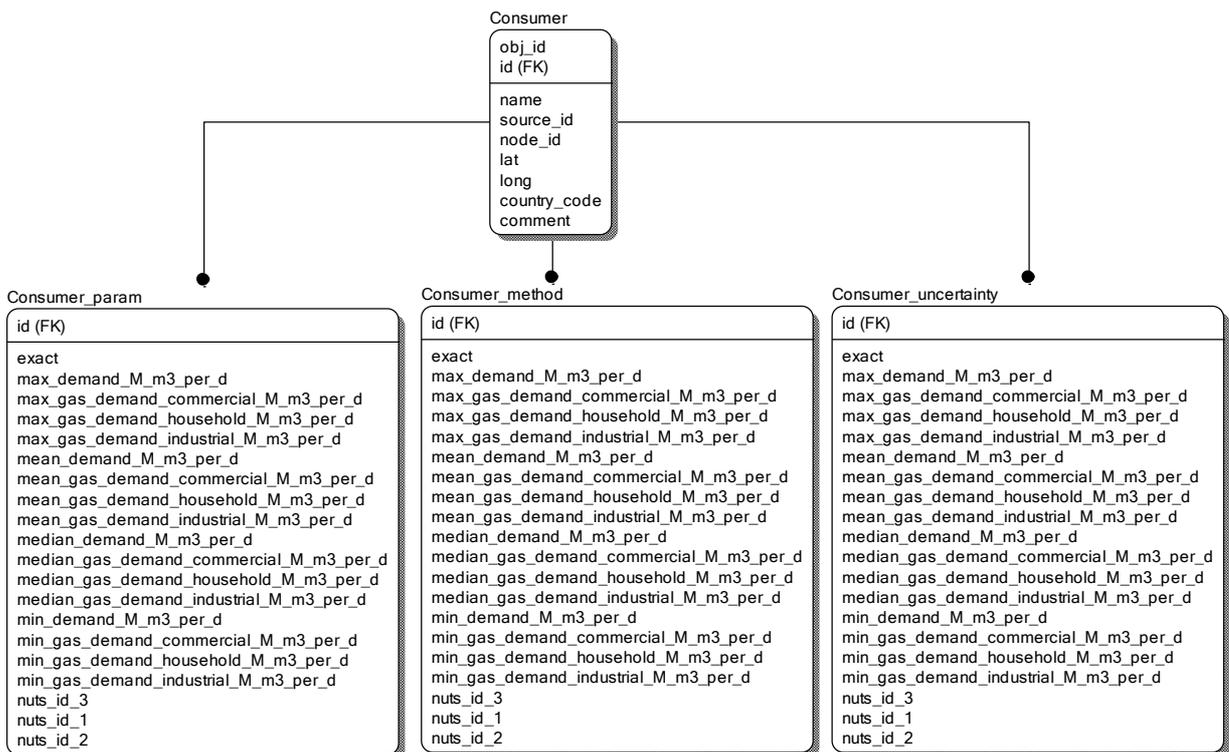


Рисунок 10: Атрибуты потребителя газа

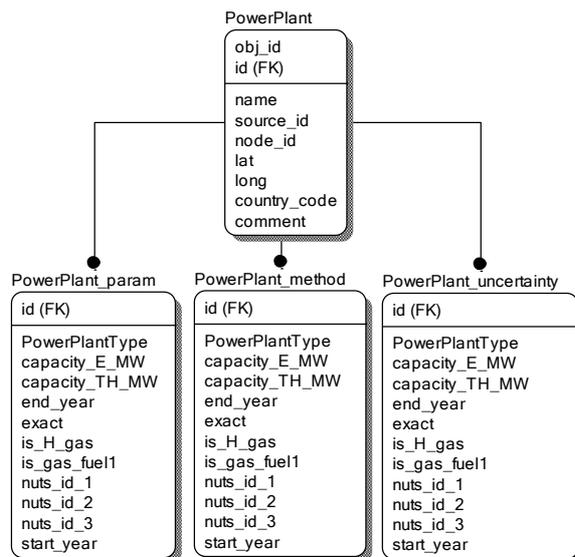


Рисунок 11: Атрибуты электростанции

На рисунке 12 представлена структура системы газоснабжения Европейского союза, построенная с помощью инструментария ГеоАРМ на основе массива IGGIELGNC-3.

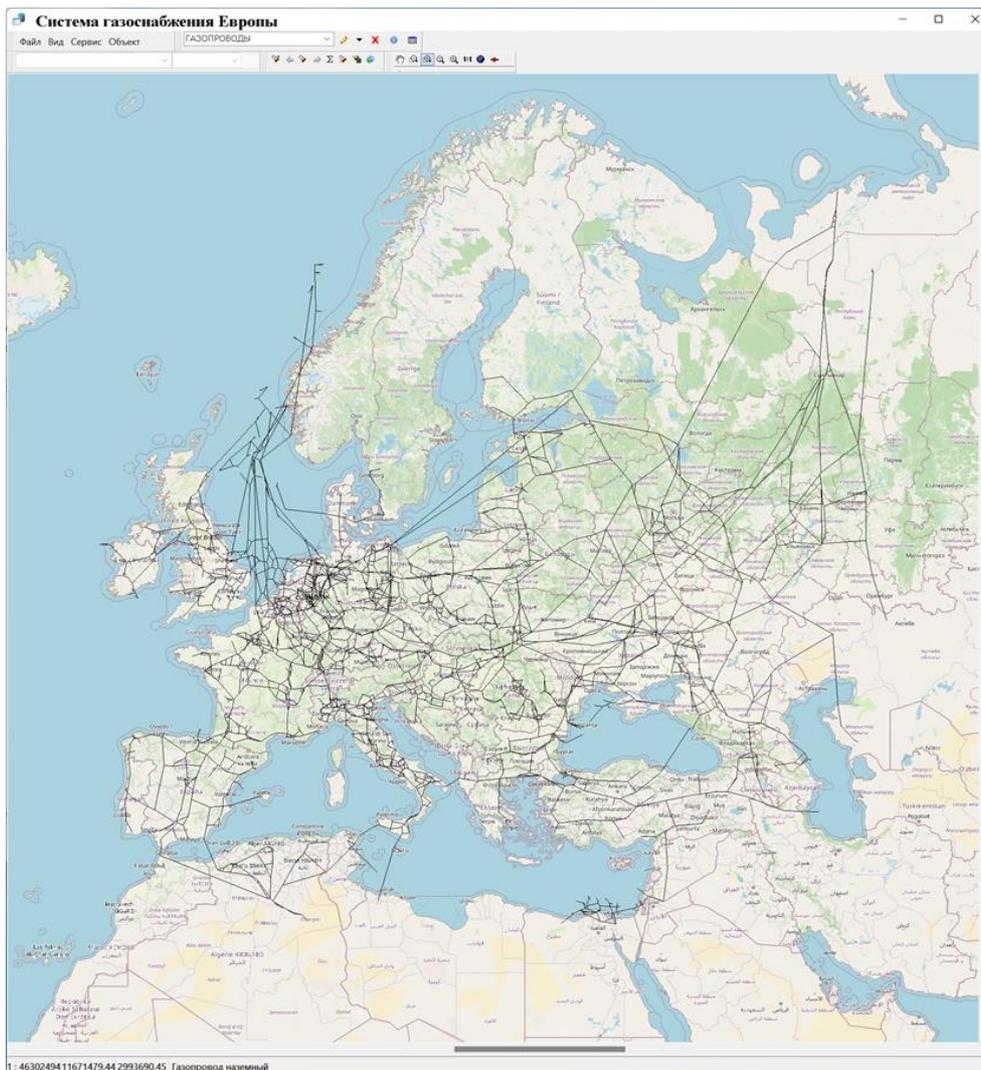


Рисунок 12: Структура системы газоснабжения Европы на 2021 г.

Далее авторами планируется проведение верификации и валидации данных в БД. Причиной проведения этих процедур является тот факт, что многие значения атрибутов объектов ЭС в проекте SciGRID_gas были получены оценочным путём. Например, точные направления потока на большинстве участков МГ остаются неизвестными. Более того, некоторые участки МГ способны работать в двух направлениях. Поэтому, авторами проекта SciGRID_gas был разработан эвристический метод определения направления потока газа [82].

Необходимость верификации и валидации данных в БД также подтверждается работой [77], в которой массивы данных SciGRID_gas использовались для создания газотранспортной сети Германии. В [77] сказано, что во время очистки данных были найдены и удалены 10 изолированных подсетей, которые не были связаны с основной сетью. Также было удалено примерно 50 участков МГ, у которых один и тот же узел был указан как входной и выходной, а длина этих участков МГ была установлена нулевой.

2.4. Создание графиков потребления энергоресурсов

В рамках проекта SciGRID_gas были получены массивы данных SciGRID_gas CONS [82], которые содержат ежедневное потребление природного газа с 2010 по 2019 год с разбивкой на промышленный, жилой и коммерческий сектора для всех регионов стран Европейского союза на уровне NUTS-1, NUTS-2 и NUTS-3.

Валидация SciGRID_gas CONS в части, касающейся Германии, была проведена в работе [77] путём сопоставления этих массивов данных с подобными из DemandRegio [83]. Результаты сравнения показали, что для промышленного сектора DemandRegio, как правило, устанавливает более высокие значения спроса на природный газ, чем SciGRID_gas CONS. Что касается жилого и коммерческого сектора, то значения в этих массивах данных практически совпадают.

Построение моделей потребления природного газа основано на методике анализа временных рядов, включающей 3 основных этапа [85, 86]:

1. Предварительный анализ временного ряда.
2. Построение тренд-сезонной модели.
3. Оценка точности и адекватности полученной модели.

Анализируемый временной ряд отражает ежедневное потребление газа для промышленных, бытовых и коммерческих нужд в конкретной географической точке за 10 лет. На первом этапе проводится визуальная оценка графика временного ряда, которая позволяет предположить основные параметры ряда, такие как структура, наличие аномальных наблюдений. Далее, используя различные статистические критерии, характеристики ряда уточняются.

Далее представим процесс разработки и оценки модели потребления газа в одном из районов Австрии (точка AT226). Для временного ряда на первом этапе была проведена проверка на сопоставимость, однородность данных. Визуальный анализ позволил предположить, что ряд содержит трендовую и сезонную составляющие. Анализ автокорреляционной функции уровней ряда и коррелограммы подтвердили наличие линейного тренда и сезонной составляющей с лагом 365 дней.

Следующий этап используемой методики заключается в построении тренд-сезонной модели. Методом спектрального анализа, позволяющего представить периодические сезонные колебания в виде линейной комбинации синусов и косинусов, была определена гармоника под номером 1 с наиболее значимым спектром.

Таким образом, модель ежедневного потребления природного газа представляется суммой линейного тренда, сезонной компоненты с периодом 365, описываемой тригонометрическими функциями, и случайной составляющей:

$$Y(t) = a_0 + a_1 t + a_2 \cos \frac{2\pi t}{365} + a_3 \sin \frac{2\pi t}{365} + E(t), \quad (12)$$

где t – уровень ряда; a_0, a_1, a_2, a_3 – параметры уравнения регрессии, рассчитанные методом наименьших квадратов; $E(t)$ – случайная составляющая.

Для исследуемого временного ряда была получена аналитическая модель:

$$Y(t) = 0.181 + 0.000003t + 0.039 \cos \frac{2\pi t}{365} + 0.012 \sin \frac{2\pi t}{365} + E(t), \quad (13)$$

На рисунке 13 представлен график, отражающий фактические и расчетные значения объема потребления газа.

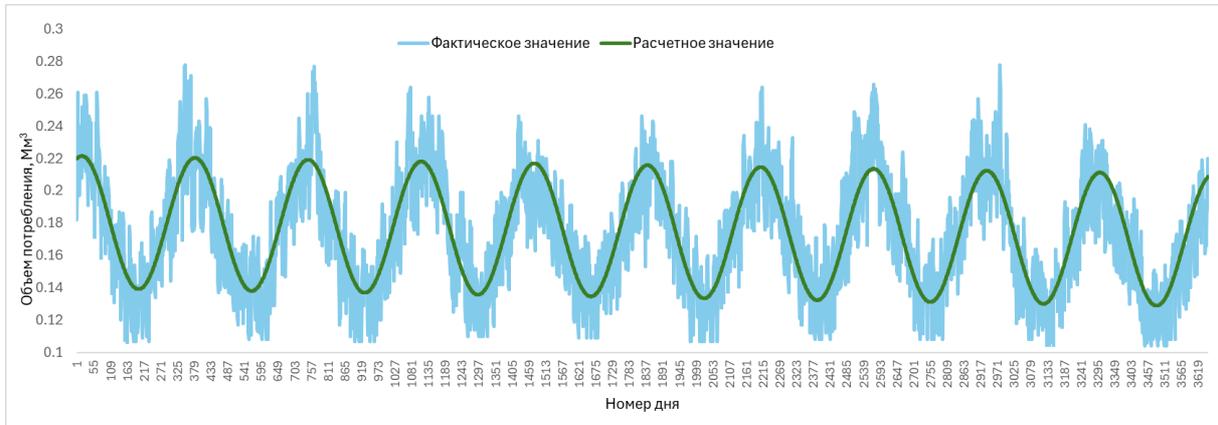


Рисунок 13: Ежесуточный объем потребления газа (фактическое и расчетное значения)

На заключительном этапе моделирования потребления газа проводится оценка адекватности полученной модели на основании коэффициента детерминации R^2 и критерия Фишера. Точность модели оценивается с помощью ошибок аппроксимации: MAE (Mean Absolute Error, средняя абсолютная ошибка), RMSE (Root Mean Squared Error, стандартная ошибка), MAPE (Mean Absolute Percentage Error, средняя абсолютная процентная ошибка).

Для модели (13) были получены следующие оценки. Коэффициент детерминации $R^2 = 68.6\%$, т. е. модель объясняет 68.6% вариации потребления природного газа, а остальные 31.4% приходится на влияние внешних факторов.

Модель (13) признается значимой в целом с вероятностью 95% и пригодной для прогнозирования, т.к. расчетное значение F-статистики $F_{\text{расч}} = 2659$, значительно превышает табличное значение $F_{\text{табл}} = 2.6$ для уровня значимости 0.05.

При оценке точности модели рассчитаны значения ошибок: MAE = 0.0156 Мм³; RMSE = 0.02 Мм³; MAPE = 9.3%. Точность модели можно считать удовлетворительной.

График остаточной компоненты позволяет предположить, что она носит случайный характер, что подтверждает адекватность модели (рисунок 14).

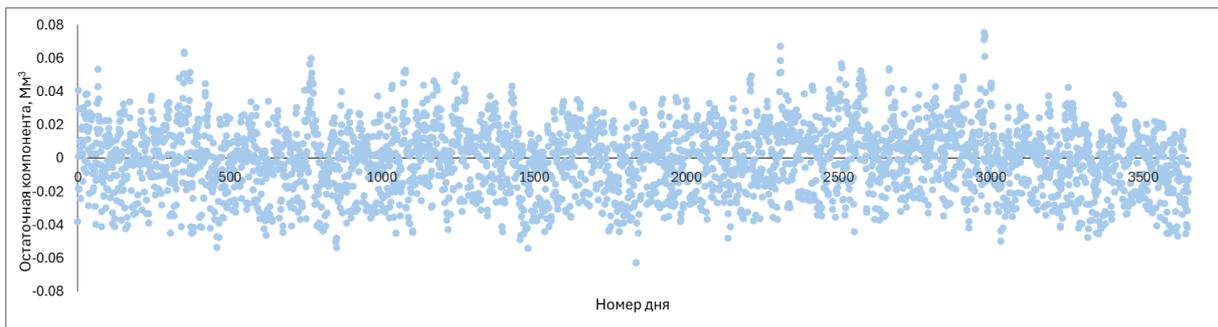


Рисунок 14: Остаточная компонента временного ряда

Результаты оценки адекватности и точности модели дают возможность использовать ее для анализа и прогнозирования потребления газа для территориальных субъектов Евросоюза уровня NUTS-3. Модель направлена на реализацию в распределенной вычислительной среде для ускорения расчетов по множеству потребителей.

3. Заключение

Существенным недостатком моделей отраслевых СЭ, предназначенных для исследований живучести систем газоснабжения, нефте- и нефтепродуктоснабжения является их статичность, что делает указанные модели пригодными только для исследований одной из сторон живучести СЭ - адаптации системы к возмущению. Для ухода от статичности и связанных с ней проблем в исследованиях живучести СЭ необходима разработка многопериодных потоковых моделей, которые позволят более реалистично и точно представлять функционирование СЭ в экстремальных условиях.

Одной из современных тенденций в энергетических исследованиях является использование открытых данных. Основными результатами первой части процесса разработки модели системы газоснабжения Европейского союза на основе открытых данных являются создание БД для хранения структуры системы газоснабжения и построение посуточных графиков потребления газа.

4. Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

5. Список литературы

- [1] Ю.Н. Руденко (ред.), Надежность систем энергетики и их оборудования (в 4-х т.), т. 1: Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики, Москва, Энергоатомиздат, 1994, 480 с.
- [2] E. Zio, Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures, *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 152, pp. 137-150.
- [3] P. Gasser, P. Lustenberger, M. Cinelli et al., A review on resilience assessment of energy systems, *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2019, pp. 1–27.
- [4] Н.И. Воропай, Л.Д. Криворуцкий, Ю.Н. Руденко, И.А. Шер Основные методические принципы исследования и обеспечения живучести систем энергетики, *Методы и модели исследования живучести систем энергетики*, Новосибирск, Наука. Сибирское отделение, 1990, 285 с.
- [5] N. Voropai, C. Rehtanz, Flexibility and Resiliency of Electric Power Systems: Analysis of Definitions and Content, In *EPJ Web of Conferences*, EDP Sciences, 2019, vol. 217, p. 01018.
- [6] М.Г. Булат, И.З. Шахмаев, П.В. Илюшин, М.А Рабинович, О влиянии организационно-технических мероприятий на каскадное развитие аварий в электроэнергетических системах с неоднородными параметрами, *Электричество*, 2023, № 5, с. 24-37.
- [7] S. Hosseini, K. Barker, J.E. Ramirez-Marquez, A review of definitions and measures of system resilience, *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 145, pp.47-61.
- [8] Н.И. Воропай Надежность систем энергетики (Сборник рекомендуемых терминов), Москва, ИАЦ «Энергия», 2007, 194 с.
- [9] Z. Bie, Y. Lin, G. Li, F. Li. Battling the extreme: A study on the power system resilience, *Proc. IEEE*, Apr. 2017, vol. 105, no. 7, pp. 1253-1266
- [10] A. Sharifi, Y. Yamagata, Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60, pp.1654-1677.
- [11] Y. Lin, Z. Bie, A. Qiu, A review of key strategies in realizing power system resilience, *Global Energy Interconnection*, 2018, 1(1), pp.70-78.

- [12] C.R. Poulin, M.B. Kane, Infrastructure resilience curves: Performance measures and summary metrics, *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, vol. 216, p. 107926. doi: 10.1016/j.res.2021.107926.
- [13] S. Ahmadi, Y. Saboohi, A. Vakili, Frameworks, quantitative indicators, characters, and modeling approaches to analysis of energy system resilience: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 144, p.110988.
- [14] M.Panteli, P. Mancarella, D.N. Trakas, E. Kyriakides, N.D. Hatziaargyriou, Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6), pp. 4732-4742.
- [15] A. Dehghani, M. Sedighzadeh, F. Haghjoo, An overview of the assessment metrics of the concept of resilience in electrical grids, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31(12), p. e13159.
- [16] A. Gholami, T. Shekari, M.H. Amirioun et al., Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience, *IEEE Access*, 2018, 6, pp. 32035-32053.
- [17] А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина. Моделирование автономной микросети, *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2023, № 3(31), с. 74-85. doi:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
- [18] X. Liu, Y.P. Fang, E. Zio, A hierarchical resilience enhancement framework for interdependent critical infrastructures, *Reliability engineering & system safety*, 2021, vol. 215, p. 107868.
- [19] X. Liu, E. Ferrario, E. Zio, Identifying resilient-important elements in interdependent critical infrastructures by sensitivity analysis, *Reliability engineering & system safety*, 2019, vol. 189, p. 423-434.
- [20] J. Johansson, H. Hassel, Modelling, simulation and vulnerability analysis of interdependent technical infrastructures, *Risk and interdependencies in critical infrastructures: a guideline for analysis*, London, Springer-Verlag, 2012, pp. 49-66.
- [21] Н.И. Воропай, В.А. Стенников (ред.), Иерархическое моделирование систем энергетики, Новосибирск, Академическое изд-во «Гео», 2020, 314 с.
- [22] А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина. Методика оценки живучести автономной микросети, *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2023, № 4(32), с. 117-126. doi: 10.25729/ESI.2023.32.4.010.
- [23] А.В. Еделев, С.М. Сендеров, Н.М. Береснева, И.А. Сидоров, А.Г. Феоктистов, Распределённая вычислительная среда для анализа уязвимости критических инфраструктур в энергетике, *Системы управления, связи и безопасности*, 2018, №3, с. 197-231.
- [24] Н.М. Береснева, А.В. Еделев, Р.О. Костромин, Методика выбора алгоритмов оптимизации живучести энергетических инфраструктур, *Системы анализа и обработки данных*, №4, 2023, с. 95-214. doi: 10.17212/2782-2001-2023-4-97-129
- [25] E. Houstis, E. Gallopoulos, R. Bramley, J. Rice, Problem-solving environments for computational science, *IEEE Computational Science & Engineering*, 1997, vol. 34, no. 3, pp. 18–21.
- [26] Л.Д. Криворуцкий, Л.В. Массель, Информационная технология исследований развития энергетики, Новосибирск, Наука, Сиб. издат. фирма РАН, 1995, 160 с.
- [27] А.В. Еделев, Предметно-ориентированная среда для исследования живучести энергетических инфраструктур, *Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления (ITHC-2023) : материалы VII Международной научно-практической конференции*, Хабаровск, ФГБУН Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДО РАН, 2023, т. 1, с. 85-87.
- [28] A. Feoktistov, A. Edelev, F. Tchernykh, S. Gorsky, O. Basharina, E. Fereferov, An Approach to Implementing High-Performance Computing for Problem Solving in Workflow-based Energy Infrastructure Resilience Studies, *Computation*, 2023, vol. 11, no. 12, p. 243.
- [29] Г.К. Данилов, Реализация методов расчёта связанности сетей в пакетах программ для исследования живучести систем энергетики, *Материалы конференции «Ляпуновские чтения 2023»* (г. Иркутск, 4 – 8 декабря 2023 г.), Иркутск, ИДСТУ СО РАН, 2023, с. 184.
- [30] И.В. Бычков, С.А. Горский, А.В. Еделев, Р.О. Костромин, И.А. Сидоров, А.Г. Феоктистов, Е.С. Фереферов, Р.К. Федоров, Поддержка управления живучестью систем энергетики на основе комбинаторного подхода, *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2021, № 6, с. 122-135. doi: 10.31857/S000233882106007X.

- [31] Е.С. Фереферов, И.В. Бычков, А.Е. Хмельнов, Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций, *Вычислительные технологии*, 2014, № 5(19), с. 85-100.
- [32] А.В. Еделев, Н.М. Береснева, Подход к моделированию функционирования взаимосвязанных систем энергетики в условиях возмущений и его программная поддержка, *Программные продукты и системы*, 2021, № 3(34), с. 409-419. doi: 10.15827/0236-235X.135.409-419.
- [33] J. Johansson, H. Hassel, An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis, *Reliability Engineering & System Safety*, 2010, 95(12), pp.1335-1344.
- [34] J. Johansson, H. Hassel, Modelling, simulation and vulnerability analysis of interdependent technical infrastructures, *Risk and Interdependencies in Critical Infrastructures: A Guideline for Analysis*, London, Springer-Verlag, 2012. p. 49-66.
- [35] J. Elam, F. Glover, D. Klingman, A strongly convergent primal simplex algorithm for generalized networks. *Mathematics of Operations Research*, 1979, 4(1), pp.39-59.
- [36] K.G. Murty, *Network programming*, 1992, Prentice-Hall, Inc.
- [37] P. Kovács, Minimum-cost flow algorithms: an experimental evaluation, *Optimization Methods and Software*, 2015, vol. 30, no. 1, pp. 94–127.
- [38] D. Williamson, *Network flow algorithms*, 2019, Cambridge, Cambridge University Press.
- [39] R.K. Ahuja, T.L. Magnanti, J.B. Orlin, *Network flows: Theory, Algorithms, and Applications*, 1993, Prentice-Hall, Inc.
- [40] F. Glover, D. Klingman, On the equivalence of some generalized network problems to pure network problems, *Mathematical Programming*, 1973, 4, pp.269-278.
- [41] K. Truemper, An efficient scaling procedure for gain networks, *Networks*, 1976, 6(2), pp.151-159.
- [42] E. Sterbin Gottlieb, Solving generalized transportation problems via pure transportation problems, *Naval Research Logistics (NRL)*, 2002, 49(7), pp.666-685.
- [43] D.R. Morrison, J.J. Sauppe, S.H. Jacobson, An algorithm to solve the proportional network flow problem, *Optimization Letters*, 2014, 8, pp.801-809.
- [44] А.В. Храмов, С.М. Еникеева и др., Программное и информационное обеспечение решения задач живучести Единой системы газоснабжения СССР, *Методы и модели исследования живучести систем энергетики*, Новосибирск, Наука, Сиб. Отд, 1990, с. 86-91.
- [45] С.М. Клименко, С.М. Сендеров, В.А. Янченко, 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.
- [46] W. Kröger, *Achieving Resilience of Large-Scale Engineered Infrastructure Systems*, Resilient Structures and Infrastructure. Springer, Singapore, 2019, pp. 289-313.
- [47] I. Zalitis, A. Dolgicers, L. Zemite et al., Mitigation of the impact of disturbances in gas transmission systems, *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2022, 39, p. 100569.
- [48] Y. Fang, E. Zio, Resilience Management of Infrastructure Systems from a Multistage Decision Making Perspective, In 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL2019), 2019, pp. 3382-3389.
- [49] N. Ghorbani-Renani, A.D. González, K. Barker, A decomposition approach for solving tri-level defender-attacker-defender problems, *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 153, p.107085.
- [50] M. Ouyang, C. Liu, M. Xu, Value of resilience-based solutions on critical infrastructure protection: Comparing with robustness-based solutions, *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, 190, p. 106506.
- [51] M. Ouyang, C. Liu, S. Wu, Worst-case vulnerability assessment and mitigation model of urban utility tunnels, *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 197, p.106856.
- [52] M. Salimi, H. Ghasemi, S. Vaez-Zadeh, IRAN' s electricity and natural gas networks modeling by means of energy hubs, in *Proc. IEEE Environment and Electrical Engineering II th International Conf*, 2011, pp. 648-654,

- [53] T. Liu, D. Zhang, S. Wang, T. Wu, Standardized modelling and economic optimization of multi-carrier energy systems considering energy storage and demand response, *Energy Conversion and Management*, 2019, 182, pp. 126-142.
- [54] Y. Wang, J. Cheng, N. Zhang, C. Kang, Automatic and linearized modeling of energy hub and its flexibility analysis, *Appl Energy* Feb, 2018, pp. 211:705–14.
- [55] Y. Wang, N. Zhang, C. Kang, D.S. Kirschen, J. Yang, Q. Xia, Standardized matrix modeling of multiple energy systems, *IEEE Trans Smart Grid*, 2019, 10, pp. 257–70.
- [56] D.E. Hollermann, M. Goerigk et al., Flexible here-and-now decisions for two-stage multi-objective optimization: method and application to energy system design selection, *Optimization and Engineering*, 2021, vol. 22, p. 821–847.
- [57] X. Zhang, S. Mahadevan, S. Sankararaman, K. Goebel, Resilience-based network design under uncertainty, *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 169, pp. 364-379.
- [58] A. Tabandeh, N. Sharma, P. Gardoni, Uncertainty propagation in risk and resilience analysis of hierarchical systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 219, p. 108208.
- [59] S. Zwickl-Bernhard, A. Rodgarkia-Dara et al., Modeling insights from the Austrian national gas grid under declining natural gas demand and increasing domestic renewable gas generation by 2040, *Energy Reports*, 2024, 11, pp. 1302-1317.
- [60] H.D. Mittelmann, Benchmarking optimization software-a (hi) story, In *SN operations research forum*, 2020, vol. 1, no. 1, p. 2, Cham, Springer International Publishing.
- [61] M.R. Bussieck, A.S. Drud, A. Meeraus, MINLPLib – a collection of test models for mixed-integer nonlinear programming. *INFORMS Journal on Computing*, 2003, 15(1), pp. 114-119.
- [62] A. Gleixner, G. Hendel et al., MIPLIB 2017: data-driven compilation of the 6th mixed-integer programming library, *Mathematical Programming Computation*, 2021, 13(3), pp.443-490.
- [63] S. Sass, T. Faulwasser et al., Model compendium, data, and optimization benchmarks for sector-coupled energy systems, *Computers & chemical engineering*, 2020, 135, p.106760
- [64] J. Klimt, N. Eiling et al., The Role of Open-Source Software in the Energy Sector. *Energies*, 2023, 16(16), p. 5855.
- [65] K. Hunter, S. Sreepathi, J.F. DeCarolis, Modeling for insight using tools for energy model optimization and analysis (Temoa), *Energy Economics*, 2013, 40, pp. 339-349.
- [66] M. Howells, H. Rogner et al., OSeMOSYS: the open source energy modeling system: an introduction to its ethos, structure and development, *Energy Policy*, 2011, 39(10), pp. 5850-5870.
- [67] Open Energy Modelling Initiative. URL: <http://openmodinitiative.org>
- [68] D. Wu, X. Zheng et al., An open-source extendable model and corrective measure assessment of the 2021 texas power outage, *Advances in Applied Energy*, 2021, 4, p. 100056.
- [69] C. Matke, W. Medjroubi, D. Kleinhans, SciGRID – An Open Source Reference Model for the European Transmission Network (v0.2), 2016. URL: <http://www.scigrd.de>
- [70] I. Hidalgo Gonzalez, K. Kanellopoulos, M. De Felice, A. Bocin, JRC Open Power Plants Database (JRC-PPDB-OPEN), European Commission, Joint Research Centre (JRC) Dabase, 2019. URL: <http://data.europa.eu/89h/9810feeb-f062-49cd-8e76-8d8cfd488a05>
- [71] IEEE, 2018. URL: <http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>
- [72] B. Bahl, S. Goderbauer et al., DESSLib – Benchmark instances for optimization of decentralized energy supply systems, Tech. rep., RWTH Aachen University, 2016. URL: <http://www.math2.rwth-aachen.de/DESSLib/>.
- [73] M. Schmidt, D. Aßmann et al., GasLib – A library of gas network instances, *Data*, 2017, 2(4), p. 40.
- [74] B. Tasseff, C. Coffrin et al., Natural gas maximal load delivery for multi-contingency analysis, *Computers & Chemical Engineering*, 2022, 168, p. 108032.
- [75] D. De Wolf, Y. Smeers, The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm, *Management Science*, 2000, 46(11), pp. 1454-1465.
- [76] A. Pluta, W. Medjroubi et al., April. SciGRID_gas-Data Model of the European Gas Transport Network, In *2022 Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES)*, IEEE, 2022, pp. 1-7.
- [77] L. Di Francesco, Modelling and Simulation of the German Gas Transmission Network with Hydrogen Blending, Doctoral dissertation, Politecnico di Torino, 2023.

- [78] J.C. Diettrich, A. Pluta, J.E. Sandoval, J. Dasenbrock, W. Medjroubi, Scigrid_gas: The final iggielgnc-1 gas transmission network data set, 2021. doi:10.5281/zenodo.5017621.
- [79] J.C. Diettrich, A. Pluta, J.E. Sandoval, J. Dasenbrock, W. Medjroubi, Scigrid_gas: The final iggielgnc-2 gas transmission network data set, 2021. doi:10.5281/zenodo.5017641.
- [80] J.C. Diettrich, A. Pluta, J.E. Sandoval, J. Dasenbrock, W. Medjroubi. Scigrid_gas: The final iggielgnc-3 gas transmission network data set, 2021. doi:10.5281/zenodo.4922529.
- [81] Exploring the European Natural Gas Network as a Knowledge Graph. URL: <https://neo4j.com/developer-blog/european-natural-gas-network-knowledge-graph>.
- [82] J. Diettrich, A. Pluta, W. Medjroubi, SciGRID_gas IGGIELGN. Version 1.1.2. Zenodo, May 2021. doi: 10.5281/zenodo.4767098. doi: 10.5281/zenodo.4767098.
- [83] A. Pluta J.E., Sandoval J.C., Diettrich, W. Medrjoubi, SciGRID_gas: The raw CONS data set». In: German Aerospace Center (DLR), Institute for Networked Energy Systems, 2021. doi: doi:10.5281/zenodo.4922515
- [84] F. Gotzens et al., DemandRegio – Harmonisierung und Entwicklung von Verfahren zur regionalen und zeitlichen Auflösung von Energienachfragen, In: Jülich, Berlin, München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2020. doi: 10.34805/ffe-119-20.
- [85] О. Башарина, А. Еделев, Т. Фер, Методика построения аналитической модели потребления природного газа, Материалы VI Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2024, 1-5 июля 2024 г., г. Иркутск, Россия), Иркутск, Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024, С. 81-85. doi: 10.47350/ICCS-DE.2024.10.
- [86] R. Kostromin, O. Basharina, A. Feoktistov, I. Sidorov, Microservice-Based Approach to Simulating Environmentally Friendly Equipment of Infrastructure Objects Taking into Account Meteorological Data, Atmosphere, 2021, 12, p. 1217. doi:10.3390/atmos12091217.