

УДК: 528.94

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-306-314

А.М. Карпачевский¹, Г.С. Титов²

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ О МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ РОССИИ

АННОТАЦИЯ

Магистральные линии электропередач России имеют сложную пространственную структуру. Систематизированные и топологически согласованные пространственно-временные данные о них отсутствуют. При этом изучение их эволюции требует не только кропотливого сбора данных, но и детального проектирования структуры базы пространственно-временных данных. Структура должна обеспечивать экономичное хранение данных, быть удобной для заполнения базы и редактирования данных, предоставлять возможности реконструирования состояния сети на заданный период и применения методов пространственного анализа. Сбор данных выполняется на основе открытых источников, например, отчётов системного оператора ЕЭС, схем и программ развития электроэнергетики ЕЭС и отдельных регионов, материалов Публичной кадастровой карты, информации Ситуационно-аналитического центра Минэнерго, и данных дистанционного зондирования очень высокого пространственного разрешения.

Пользователи не имеют прямого доступа к базе данных, а обращаются к ней с помощью типовых запросов. Взаимодействие с базой данных осуществляется через программный интерфейс (API, Application Programming Interface). Это позволяет не только выгружать данные из базы, но и встраивать их во внешние системы, в частности подключать к ним инструменты анализа, создавать на их основе картографические веб-приложения.

Предварительная обработка данных выполняется с использованием языка программирования Python, модуля Arcpy, база данных создаётся с использованием СУБД PostgreSQL, работа программного интерфейса для обращения пользователей к сведениям из базы данных обеспечивается PostgREST.

Согласованная многовременная пространственную база данных, которая послужит основой для анализа структурных особенностей электрических сетей, даст возможность визуализировать историю развития энергосистемы с привязкой к территории в рамках интерактивного картографического веб-приложения, позволит выполнять геоинформационную обработку и расчёты с помощью специальных инструментов сетевого анализа. Возможность детального изучения эволюции магистральных электросетей необходима в долгосрочных стратегиях развития электросетевого комплекса.

За рубежом исследования эволюции электрических сетей, как правило, оперируют схематичным графом сети без привязки к реальной пространственной геометрии, поэтому проблема проектирования структуры пространственно-временных данных не стоит так остро. Однако игнорирование топоморфологических отношений в сети ведёт к потере

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: karpach-am@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: gberman.s.titov@gmail.com

информации о своеобразной мозаичности электрических сетей, что в свою очередь обуславливает ухудшение качества пространственного анализа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: географические сети, геоинформационный анализ, сетевой анализ, эволюция сети, энергосистема.

Andrey M. Karpachevskiy¹, German S. Titov²

SPATIO-TEMPORAL DATABASE DESIGN FOR BACKBONE POWER GRID OF RUSSIA

ABSTRACT

Backbone power lines in Russia have a complex spatial structure. There are no systematized and topologically consistent spatio-temporal data about them. However, the study of their evolution requires not only data mining, but also a comprehensive design of the structure of the spatio-temporal database. The structure should provide effective data storage, be convenient for filling the database and editing data, provide the ability to reconstruct the network for a given period and apply spatial analysis methods.

Open sources like power grid operator reports, schemes and programs of power grid development, public cadastral map, information from Situational and Analytical Center of the Ministry of Energy and very high spatial resolution remote sensing data are the main data sources.

Users do not have direct access to the database but refer to it using queries. Interaction with the database is carried out through Application Programming Interface (API). This allows downloading data from the database as well as embedding them into external systems, for example, connecting analysis tools to them, creating cartographic web applications with this data.

Data preprocessing is performed in Python using the Arcpy module, the database is created with PostgreSQL, the API works on PostgREST.

Consistent multi-temporal spatial database serves as the basis for analyzing the structural features of electrical networks, makes it possible to visualize the history of the development of the power grid of the territory in an interactive web-based mapping application, allows to apply geoprocessing tools and special network analysis tools. The detailed study of the evolution of backbone power grids is crucial in long-term strategies for the development of the power grid.

Abroad, studies of the evolution of electrical networks usually operate with a schematic graph of a network without reference to real spatial geometry, therefore, there is no problem of designing the structure of spatio-temporal database. Yet, ignoring topomorphological relationships in the network leads to the loss of information about electrical networks, which leads to a loss in the quality of spatial analysis.

KEYWORDS: geographical networks, GIS-analysis, network analysis, network evolution, power grid.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение электрических сетей в их пространственном и временном аспекте выявляет ряд серьезных проблем, например, отсутствие систематизированных и топологически согласованных пространственно-временных данных по магистральным

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: karpach-am@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: gberman.s.titov@gmail.com

электрическим сетям России, а также геоинформационных инструментов их анализа и общедоступной интерактивной картографической визуализации данных. Кроме того, пространственная эволюция электрических сетей – это слабо проработанное направление в географии на текущий момент не только в России, но и в мире. Это можно объяснить тем, что до недавнего времени подобная информация была недоступна для исследователей. В рамках исследования пространственно-временных особенностей развития магистральных сетей представляется критически важной разработка, во-первых, базы пространственных данных, которая была бы удобна для таких исследований, во-вторых, комплекса картографо-геоинформационных инструментов для изучения особенностей пространственно-временного развития магистральных электрических сетей России, которые отражаются в пространственной структуре сети и её топологических особенностях. Немаловажную роль такая база данных будет играть для анализа структурной уязвимости сети [Rosas-Casals et al., 2007; Crucitti et al., 2005; Фаддеев, 2016].

Сбор пространственных данных о сетях 220-750 кВ осуществлялся по мозаикам космических снимков очень высокого пространственного разрешения. По этим же данными мы выделили участки различного возраста, различных применяемых видов опор, количества цепей на общих опорах, марок проводов определенной пропускной способности. Реконструкция исторического развития электрических сетей осуществляется с использованием различных архивных и пространственных данных (карты, схемы, публикации). Собранные данные на территорию всей России планируется свести, структурировать и согласовать в единую многовременную базу пространственных данных.

В данной работе целью исследования является разработка структуры базы данных, которая была бы удобна для наполнения, хранения, редактирования и анализа пространственно-временных данных о магистральных электрических сетях. Конечным результатом нашего исследования станет картографический веб-ресурс, размещенный в сети Интернет. Для пользователей будут доступны как инструменты визуализации данных, так и аналитические инструменты для расчёта различных структурных показателей сети. На основе разработанного ресурса впервые откроется возможность детального изучения эволюции магистральных электросетей. Данный ресурс может представлять значительный интерес и для прикладного использования, например, при долгосрочном планировании развития электросетевого комплекса

Актуальными остаются вопросы проектирования базы для хранения пространственно-временных данных об электросетях. В отличие от многочисленных отечественных и зарубежных исследований структурных особенностей электрических сетей впервые в данном проекте за основу будет взята пространственная составляющая, которая играет решающую роль в территориальном планировании. Помимо пространственной составляющей в сетевых моделях будут учтены топологические особенности электрических сетей, которые практически никогда не учитываются в подобных исследованиях, но могут существенно влиять на точность и достоверность результатов сетевого анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прикладной задачей исследования является создание информационной системы, к которой пользователь может обратиться, чтобы получить желаемые данные об электрической сети. Она должна обеспечивать возможность восстановления векторного набора данных на конкретный временной срез, а также применение геоинформационных методов к хранящимся данным. Создание информационной системы включает проектирование и наполнение базы данных и разработку программного интерфейса (API, Application Programming Interface) для обращения к ней.

Проектирование базы данных заключается в формулировании и обосновании её структуры. В основу проектирования ложится следующий принцип: каждый атрибут является отдельным полем, каждое наблюдение является отдельной строкой, каждый класс наблюдаемых объектов является отдельной таблицей [Wickham, 2014]. Для многовременных данных ситуация усложняется, но принципы остаются теми же [Wang, Cook, Hynndman, 2020]. Для электрических сетей на данный момент нет серьёзных наработок по созданию пространственно-временных баз данных, поскольку для исследований и для решения производственных задач зачастую используют только данные, отражающие текущее состояние сети. Так, например, известна попытка создания базы данных для оценки уязвимости сети на основе открытых данных Open Street Map [Medjroubi W., Vogt, 2017]. Что касается применения пространственно-временных моделей данных для других видов сетей, например, автодорожных, следует понимать, что они акцентируют внимание на изменении параметров сети со временем (динамика), а не на появлении или исчезновении отдельных элементов сети (эволюция) [George, Shekhar, 2008].

Основная проблематика хранения многовременных данных заключается в том, что мы должны представить один и тот же объект в разных состояниях в разные моменты времени. Например, если делать отдельные наборы данных для каждого года существования энергосистемы, то это приведёт к избыточности хранимой информации, а также усложнит её редактирование и проведение аналитических операций. Наблюдение в нашем случае – это элементарная, неизменяемая единица базы данных, объект класса. Например, чтобы сделать запись об электростанции мы наблюдаем уникальный набор значений атрибутов и геометрию. Если значения атрибутов или геометрия изменяются, то мы наблюдаем новый объект. Новый объект может совпадать с другим в пространстве (геометрия не меняется), но они будут наблюдаться в разные периоды и обладать разными атрибутами, потому что, например, в определённый год произошло изменение установленной мощности электростанции. До этого момента мы наблюдали старый объект, а после – новый.

Классами объектов в базе данных являются участки ЛЭП, электростанции, подстанции, прочие коммутирующие пункты (Рис. 1).

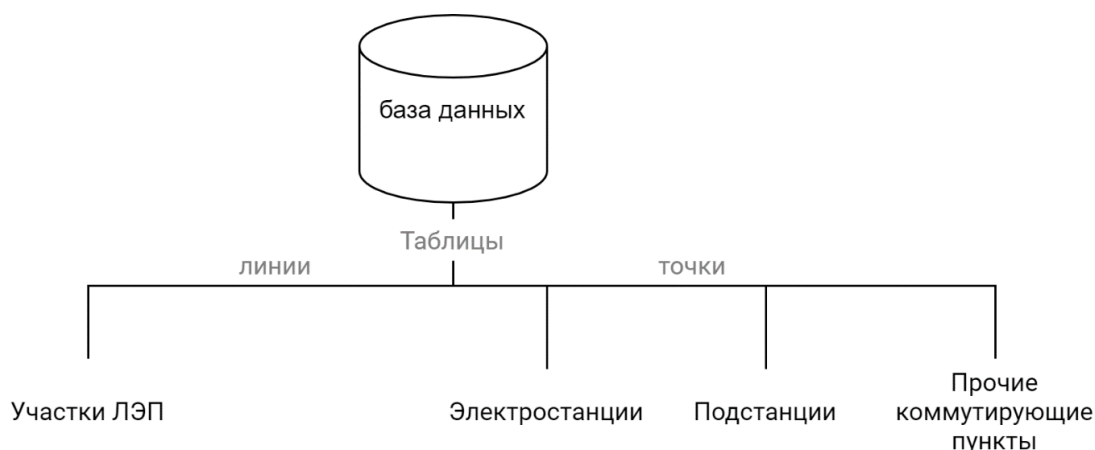


Рис. 1. Структура базы данных

Fig. 1. Database structure

Наборы полей в таблицах характеризуют атрибуты объектов (Табл. 1-4). Они подбираются с учётом того, что должна быть обеспечена уникальность и неизменность каждого наблюдения объекта. Временная составляющая данных разбивается на два поля, одно из которых отвечает за время появления объекта (его первого наблюдения) и за время

исчезновения объекта (наблюдения его отсутствия). При этом имеется в виду необязательно физический объект, а участки, обладающие постоянным и неизменным набором характеристик. Для атрибутов напряжения и типа используется домен значений в силу особенностей атрибута, например, в электросетях есть только два типа подстанций – обычные электрические с возможностью понижения напряжения, и распределительные, на которых напряжение не понижается). Пунктом начала и пунктом конца участка ЛЭП может быть только электростанция или подстанция. Этими пространственными (топологическими, сетевыми) отношениями выражается связь между сущностями в базе данных. Она не выражается напрямую в отношениях атрибутивных таблиц, а содержится их геометрической составляющей. Наличие этой связи гарантируется корректным процессом сбора и подготовки данных. Поэтому важным является удобство работы с БД в ГИС. Следует отметить, что в предлагаемой структуре отношений базы данных все атрибуты вводятся пользователем, а расчётных полей нет, но они могут появиться при дальнейшем использовании данных для расчёта различных сетевых и структурных показателей.

Табл. 1. Структура таблицы электростанций

Table 1. Table structure for power plants

Поле	Тип поля
идентификатор	целое
геометрия	геометрия
тип	текст
электрическая мощность	действительное
наименование	текст
альтернативное наименование	текст
год ввода в эксплуатацию	целое
год вывода из эксплуатации	целое

Табл. 2. Структура таблицы электрических подстанций

Table 2. Table structure for electrical substations

Поле	Тип поля
идентификатор	целое
геометрия	геометрия
тип	текст
высшее напряжение	целое
наименование	текст
альтернативное наименование	текст
номер	текст
год ввода в эксплуатацию	целое
год вывода из эксплуатации	целое

Табл. 3. Структура таблицы прочих коммутирующих пунктов

Table 3. Table structure for other commutating devices

Поле	Тип поля
идентификатор	целое
геометрия	геометрия
тип	текст
напряжение	целое
наименование	текст
год ввода в эксплуатацию	целое
год вывода из эксплуатации	целое

Табл. 4. Структура таблицы участков ЛЭП

Table 4. Table structure for power line segments

Поле	Тип поля
идентификатор	целое
геометрия	геометрия
тип линии	текст
напряжение	целое
наименование	текст
пункт начала	текст
пункт конца	текст
номер цепи	целое
наличие отпайки	текст
перечень пунктов отпаяк	текст
год ввода в эксплуатацию	целое
год вывода из эксплуатации	целое
пропускная способность	действительное

На этапе сбора исходных данных существующие векторные данные об электрических сетях, собранные в рамках предыдущего проекта (РФФИ-РГО №17-05-41115) будут уточнены и детализированы методами визуального дешифрирования мозаик космических снимков очень высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. На данный момент линейные объекты в базе данных включают в себя геометрию объекта, номинальное напряжение, диспетчерское наименование, диспетчерский номер, номер цепи, наименование пункта начала и пункта конца. В ходе дешифрирования для каждой ЛЭП будут присвоены характеристики цепности (количества цепей, подвешенных в составе данной линии на опоры), видовой состав опор (сочетание видов опор на участках). На основе видовых составов опор, а также архивных данных линии будут разбиты на участки

однородного видового состава, который говорит об одном времени строительства. По архивным данным, а также косвенным дешифровочным признакам будет восстановлено историческое размещение сетей 220–750 кВ.

Для того чтобы избежать краевого эффекта модели, нами также будут собраны пространственные данные о магистральных электрических сетях приграничных регионов стран-соседей на основе мозаик космических снимков очень высокого и сверхвысокого разрешения на общедоступных сервисах. Для этого также будут использованы схемы сетей и архивные данные, в том числе аналоговые (публикации, отчёты, схемы и программы развития), об истории развития электрических сетей. Существующие пространственные данные, отражающие современное размещение магистральных сетей России будут детализированы с точки зрения семантики, т.е. для отдельных участков будут присвоены атрибуты времени строительства, реконструкции, демонтажа, пропускной способности.

Перед импортом данных в базу выполняется предварительная обработка исходных данных. Её основными операциями являются:

- 1) проецирование данных;
- 2) топологическая коррекция сети – соединение концов линий с соответствующими подстанциями или электростанциями;
- 3) обработка сложной геометрии – гиперрёбер, которые описывают роль отпаек в электрических сетях;
- 4) семантический разбор названий объектов и наполнение атрибутивной таблицы на основе топологических правил.

Для чтения информации из базы данных пользователями разрабатывается программный интерфейс обращения к базе. Он включает набор типовых запросов, с помощью которых пользователь может получить интересующую его информацию. При этом в качестве пользователя может выступать внешняя система, которая, например, запрашивает данные, чтобы на их основе построить карту электрической сети региона на определённый год или подсчитать характеристики надёжности/уязвимости узла электро-сети за несколько лет. Обращение к программному интерфейсу выполняется по URL.

Для получения исходных данных используется программа Google Earth. Предварительная обработка данных выполняется с помощью скриптов на языке программирования Python с использованием модуля Arcpy. В роли системы управления базой данных выступает PostgreSQL, а для формирования программного интерфейса применяется PostgREST.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проекта впервые планируется создать согласованную многовременную пространственную базу данных, которая послужит основой для анализа структурных особенностей электрических сетей.

Безусловно, за рубежом есть исследования эволюции электрических сетей, но, как правило, эти исследования оперируют схематичным графом сети без привязки к реальной пространственной геометрии [Buzna, 2009; Rosas-Casals, 2010]. В результате такого подхода не учитываются особенности метакронного развития сети, т.е. когда одна линия, являющаяся единым ребром графа, состоит из участков разного времени строительства [Каргашин и др., 2016]. Неучёт топоморфологических отношений в сети ведёт к потере информации о своеобразной мозаичности электрических сетей, что в свою очередь обуславливает ухудшение качества пространственного анализа.

На основе обозначенной структуры базы данных пользователь сможет, например, запрашивать состояние сети на конкретный год, либо увидеть, как менялась трасса в

результате реконструкции. Он сможет запускать инструменты расчёта структурных показателей либо для всей сети в целом на конкретный год, либо их изменение за определённый период времени.

Эволюционный взгляд на состояние структуры сети позволит сделать выводы о том, какие элементы становятся более или менее структурно уязвимы. Это в свою очередь поможет делать рекомендации по развитию сети в будущем.

ВЫВОДЫ

Предложенная структура базы данных позволяет систематизировать многовременной массив исходной пространственной и атрибутивной информации о магистральных электрических. Структура позволяет добавлять вновь получаемые данные об исследуемых объектах. Параметры ввода/вывода из эксплуатации могут использоваться для запросов с учётом временного аспекта наборов данных и при этом сохраняется возможность ручного редактирования, дополнения данных через ГИС интерфейс. Например, в результате запроса по времени можно будет получить поднабор сетевых данных по состоянию на конкретный год, что применимо для дальнейшего сетевого анализа. Выполняя запрос по названию линии, можно будет получать множество всех трасс этой линии за все годы её существования. Более сложные запросы позволят выявлять такие структурные изменения в сети, как появление разрезок, отпаек, их количество за каждый год, рассчитывать изменения центральности по промежуточности и других показателей для конкретного ребра сети с течением времени.

База данных, обладающая данной структурой, с программным интерфейсом запросов применима для выполнения расчётов параметров устойчивости электросети, использования геоинформационных методов обработки данных, картографической визуализации данных.

Разработана структура удобная для редактирования и наполнения и вполне пригодная для дальнейшей работы в качестве фундамента информационной системы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации, грант № МК-5343.2021.1.5.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Council for Grants of the President of the Russian Federation, grant No МК-5343.2021.1.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каргашин П.Е., Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Карпачевский А.М.* Изучение пространственной конфигурации электросетей по космическим снимкам. *Геодезия и картография*, 2016. №3. С. 50-55.
2. *Фаддеев А.М.* Оценка уязвимости энергосистем России, стран ближнего зарубежья и Европы к каскадным авариям. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*, 2016. № 1. С. 46–53.
3. *Buzna L.* The evolution of the topology of high-voltage electricity. *International Journal of Critical Infrastructures*, 2009. V. 5. No 1/2. P. 72–85.
4. *Crucitti P., Latora V., Marchiori M.* Locating critical lines in high-voltage electrical power grids. *Fluctuation and Noise Letters*, 2005. No 2(5). P. 201–208.

5. *George B., Shekhar S.* Time-Aggregated Graphs for Modeling Spatio-temporal Networks. *Journal on Data Semantics XI. Lecture Notes in Computer Science*, 2008, V. 5383. P. 191–213. DOI: 10.1007/978-3-540-92148-6_7.
6. *Medjroubi W., Vogt T.* Open source data and models for a sustainable power grid modelling and analysis. 1st Int. Conf. on Large-Scale Grid Integration of Renewable Energy, New Delhi, India, 2017.
7. *Rosas-Casals M.* Power Grids as Complex Networks: Topology and Fragility. *Complexity in Engineering*, 2010. P. 21–26. DOI: 10.1109/COMPENG.2010.23.
8. *Rosas-Casals M., Valverde S., Solé R.V.* Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks. *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering*, 2007. V. 17(7). P. 2465–2475.
9. *Wang E., Cook D., Hyndman R. J.* A new tidy data structure to support exploration and modeling of temporal data. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 2020. V. 29. No 3. P. 466–478.
10. *Wickham H.* Tidy data. *Journal of statistical software*. 2014. V. 59. No 10. P. 1–23.

REFERENCES

1. *Buzna L.* The evolution of the topology of high-voltage electricity. *International Journal of Critical Infrastructures*, 2009. V. 5. No. 1/2. P. 72–85.
 2. *Crucitti P., Latora V., Marchiori M.* Locating critical lines in high-voltage electrical power grids. *Fluctuation and Noise Letters*, 2005. No 2(5). P. 201–208.
 3. *Faddeev A.* Assessment of vulnerability of power systems of Russia, CIS countries and Europe to cascade accidents. *Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography*, 2016. No 1. P. 46–53 (in Russian).
 4. *Kargashin P.E., Novakovskiy B.A., Prasolova A.I., Karpachevskiy A.M.* Study of the spatial configuration of power grids from satellite images. *Geodesy and cartography*, 2016. No 3. P. 50–55 (in Russian).
 5. *George B., Shekhar S.* Time-Aggregated Graphs for Modeling Spatio-temporal Networks. *Journal on Data Semantics XI. Lecture Notes in Computer Science*, 2008. V. 5383. P. 191–213. DOI: 10.1007/978-3-540-92148-6_7.
 6. *Medjroubi W., Vogt T.* Open source data and models for a sustainable power grid modelling and analysis. 1st Int. Conf. on Large-Scale Grid Integration of Renewable Energy, New Delhi, India, 2017.
 7. *Rosas-Casals M.* Power Grids as Complex Networks: Topology and Fragility. *Complexity in Engineering*, 2010. P. 21–26. DOI: 10.1109/COMPENG.2010.23.
 8. *Rosas-Casals M., Valverde S., Solé R.V.* Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks. *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering*, 2007. V. 17(7). P. 2465–2475.
 9. *Wang E., Cook D., Hyndman R. J.* A new tidy data structure to support exploration and modeling of temporal data. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 2020. V. 29. No 3. P. 466–478.
 10. *Wickham H.* Tidy data. *Journal of statistical software*. 2014. V. 59. No 10. P. 1–23.
-