

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОЙ БИБЛИОТЕКИ PANDAPOWER

Ильичев В.Ю., Жукова Ю.М.

*Калужский филиал ФГОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Калуга, e-mail: patrol8@yandex.ru*

Современные электрические сети отличаются как сильной разветвленностью (комплексностью топологии), так и наличием в своем составе большого количества разнообразного оборудования, имеющего различные (часто нелинейные) характеристики. Исходя из этого, расчет электрических сетей отличается сложностью и громоздкостью, и к настоящему времени его уже невозможно представить без использования вычислительной техники и специальных средств программирования. Настоящее исследование посвящено разработке методики, алгоритмов и программы расчета режимов электрических сетей с использованием библиотеки функций PandaPower для языка Python. Данный программный модуль отличается широкими возможностями как по созданию моделей сетей с большим разнообразием элементов в их составе, так и по выводу результатов вычислений и их анализу. Для освоения библиотеки имеются достаточное количество документации и огромная база данных по стандартным элементам электросхем. Лежащие в основе моделирования алгоритмы являются стандартизированными либо хорошо опробованными на практике в ходе эксплуатации коммерческих программных продуктов, в то время как PandaPower является свободно распространяемым программным обеспечением. В статье приведены описание предпосылок данного исследования, теоретические основы применяемой методики и ход разработки кода программы для расчета электрической сети несложной топологии. Результаты вычислений расшифрованы и проанализированы, а также произведена их визуализация. В конце работы приведены рекомендации по дальнейшему использованию созданной методики и программы, а также в целом по расширению сферы применения библиотеки функций PandaPower.

**Ключевые слова:** электрические сети, режимы работы сетей, токи короткого замыкания, топология графа, язык Python, библиотека PandaPower

## INVESTIGATION OF OPERATION MODES OF ELECTRIC NETWORKS USING PANDAPOWER SOFTWARE LIBRARY

Ilichev V.Yu., Jukova Yu.M.

*Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, e-mail: patrol8@yandex.ru*

Modern electrical networks are distinguished by both strong branching (complexity of topology) and the presence of a large number of diverse equipment with various (often non-linear) characteristics. Based on this, the calculation of electrical networks is complicated and cumbersome, and by now it is no longer possible to imagine it without the use of computer equipment and special programming tools. This study is devoted to the development of a methodology, algorithms and program for calculating the modes of electrical networks using the PandaPower function library for Python. This software module is distinguished by its wide capabilities both for creating models of networks with a wide variety of elements in their composition, and for outputting the results of calculations and analyzing them. To master the library, there is a sufficient amount of documentation and a huge database of standard elements of electrical circuits. The underlying algorithms are standardized or well-tested in practice during the operation of commercial software products, while PandaPower is freely available software. The article describes the prerequisites of this study, the theoretical foundations of the methodology used and the progress of developing the program code for calculating the electrical network of a simple topology. The results of the calculations were decoded and analyzed, as well as their visualization. The end of the work provides recommendations for further use of the created methodology and program, as well as for expanding the scope of the PandaPower function library in general.

**Keywords:** electrical networks, network modes, short-circuit currents, graph topology, Python language, PandaPower library

Исследование режимов работы электрических сетей является актуальной проблемой современной науки и техники [1], так как протяженность и сложность топологий линий электропередач постоянно возрастают из-за увеличения потребления энергии по мере развития научно-технического прогресса. При этом необходимо добиваться надежного функционирования электросетей по условиям обеспечения качества и безопасности как энергоемких технологических процессов, так и электроснабжения бытовых потребителей.

Электрические сети, как правило, являются чрезвычайно разветвленными и состоят из множества составляющих (провода, шины, трансформаторы, выключатели и пр.). Физические процессы, протекающие в сетях, также характеризуются сложностью. К счастью, в настоящее время существуют достаточно совершенные методики расчета режимов работы таких сетей, однако они отличаются громоздкостью. Поэтому для организации процессов исследования электрических сетей крайне желательно, а чаще всего просто необходимо приме-

ние компьютерной техники и специальных вычислительных алгоритмов [2].

В связи с описанными требованиями появились средства, позволяющие организовать на современном уровне решение многих задач, связанных с анализом функционирования электрических сетей, например:

- 1) расчет потоков мощности в ветвях сетей;
- 2) определение тепловых режимов работы линий электропередачи;
- 3) расчет токов коротких замыканий.

Перечисленные виды расчетов позволяют не только проверять режимы работы спроектированных сетей, но и оптимизировать их путем изменения топологии или подбора составляющих их элементов. Недавно созданным инструментом, помогающим решить указанные задачи, является специализированная библиотека для электротехнических исследований PandaPower для языка программирования Python (сама написанная на этом языке) [3].

Целью работы, описанной в данной статье, является разработка алгоритма и программного кода, наглядно демонстрирующего базовые возможности указанной библиотеки. Апробация разработанной программы должна быть произведена на примере расчета конкретной электрической сети.

Для определения объема исследования были сформулированы задачи, которые необходимо решить в ходе его проведения.

1. Создать несложную электрическую сеть, состоящую из основных базовых элементов.
2. Разработать методику описания элементов электрической схемы в виде объектов программного кода языка Python [4].
3. Подобрать средства библиотеки PandaPower, позволяющие рассчитать характеристики схемы.
4. Произвести расчет электрической схемы при работе в установленном стационарном режиме и в случае возникновения короткого замыкания в различных ее ветвях.
5. Вывести в наглядном визуальном (табличном и графическом) виде промежуточные и конечные результаты исследований.
6. Проанализировать полученные результаты, дав оценку характеристик исследуемой системы, и сделать выводы для будущих направлений научной работы с использованием рассмотренных средств.

#### **Материалы и методы исследования**

Библиотека функций PandaPower позволяет строить модели электрических сетей с использованием всех основных их элементов: проводов, шин, трансформаторов, потребителей, выключателей и пр. При этом характеристики электрических элементов

можно прописывать как вручную, так и с использованием встроенных в базу PandaPower паспортов типовых приборов. Так как библиотека PandaPower создана на основе модуля языка Python для работы с табличными данными Pandas [5], вся структура исследуемых электросетей также представляется в табличном виде. Кроме этого, широко используется теория графов, в которой элементы электрических сетей могут описываться как узлы, а соединяющие их линии электропередач – как ребра [6].

Благодаря тому что для создания библиотеки PandaPower был использован язык Python, она достаточно доступна для освоения специалистами, имеющими небольшой опыт программирования, поскольку Python справедливо считается одним из наиболее компактных, наглядных и универсальных языков. Для понимания его возможностей и функций в сети Интернет имеется множество ресурсов (сайтов, форумов и даже интерактивных средств отладки программ).

Модели энергетических систем, на которых основана библиотека PandaPower, уже тщательно отработаны на коммерческом программном обеспечении и легли в основу стандартов, поэтому произведенные с ее помощью вычисления можно считать точными и надежными. Например, в основу расчета потоков мощности при численном расчете нелинейных цепей легли алгоритмы метода Ньютона–Рафсона [7].

Широко используемым методом моделирования электросистем является разбиение сети на узлы и ветви [8]. PandaPower вместо этого применяет уникальную методику поэлементного задания топологии сети, что является более наглядным и удобным вариантом для пользователя. Такой процесс реализуется поэтапно, что будет показано далее при описании расчетной программы. Математические модели элементов электрических схем подробно описаны в документации к PandaPower.

Таким образом, материалом описываемого исследования является разработка кода программы на языке Python с использованием средств библиотеки PandaPower, позволяющей решать все сформулированные выше задачи.

Для наглядности целесообразно сразу рассмотреть программу, составленную для конкретной схемы электрической сети, представленной на рисунке 1.

Создана простая открытая кольцевая сеть с 4 шинами, соединенными с внешней сетью трансформатором, преобразующим напряжение с 20 кВ в 400 В, и тремя линиями электропередачи, имеющими одну точку секционирования [9].

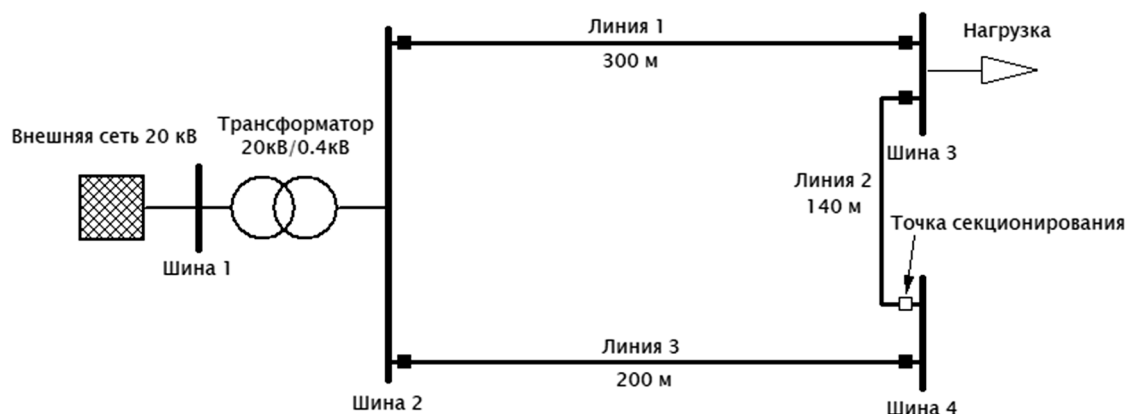


Рис. 1. Схема анализируемой электрической сети

Длина линий, точка присоединения нагрузки (с активной мощностью 70 кВт и реактивной 20 кВА) [10], а также место расположения секционного выключателя указаны на рисунке 1.

Алгоритм разработанной программы состоит из следующих блоков.

1. Импорт библиотеки функций Panda Power – как в целом, так и ее подбиблиотеки для исследования режима короткого замыкания Shortcircuit.

2. Создание шаблона электрической сети переменного тока с частотой 50 Гц при помощи команды `create_empty_network()`.

3. Добавление в сеть 4 шин с использованием команд `create_bus()`, с указанием для каждой из шин номинального напряжения и имени.

4. Командой `create_ext_grid()` создание подключения шины 1 к внешней сети с указанием в качестве аргументов следующей параметров: максимальной и минимальной полной мощности короткого замыкания (200 и 160 кВт соответственно), а также максимального и минимального отношения R/X (0,35 и 0,2 соответственно). Данные параметры необходимы для дальнейшего определения импеданса внешней сети при расчете короткого замыкания. Величина R/X представляет собой отношение активного сопротивления импеданса короткого замыкания к реактивному.

5. Подключение нагрузки к шине 3 с активной мощностью 70 кВт и реактивной 20 кВА при помощи команды `create_load()`.

6. Командой `create_transformer()` создание трансформатора стандартного типа (имеющегося в библиотеке PandaPower) мощностью 0,4 МВА и с напряжениями 20/0,4 кВ, подключенного одной обмоткой к шине 1, а противоположной обмоткой – к шине 2.

7. Согласно схеме, изображенной на рисунке 1, «протягивание» трех линий электропередачи стандартного типа, изготовленных из четырехжильного кабеля с сечением каждой жилы 50 мм<sup>2</sup>. Данные операции производятся с использованием команды `create_line()` с указанием в качестве одного из аргументов длины каждой линии, а также начальной и конечной шины подключения.

8. Командой `create_switch()` устанавливается переключатель (точка секционирования) на линии 2.

9. Проверка всех характеристик созданной сети путем вывода их на экран и запуск расчета командой `runppr()`.

10. Вывод результатов расчета шин, линий, трансформатора, нагрузки и присоединения к внешней сети.

11. С помощью команды `plotting.simple_plot()` вывод в графическом виде упрощенного изображения схемы электросети для проверки.

12. Использование команды `plotting.to_html()` для вывода графа отношений элементов исследуемой сети.

13. С помощью функции `calc_sc()` подбиблиотеки Shortcircuit вычисление максимальных и минимальных токов короткого замыкания.

14. Вывод характеристик шин при коротком замыкании в табличном виде.

### Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим результаты расчета и анализа режимов работы созданной электрической сети.

Вначале приведем и интерпретируем наиболее значимые результаты вычислений при установившемся стационарном режиме работы сети, получаемые после выполнения п. 10 приведенного выше алгоритма.

Для шин получены следующие значения активной и реактивной мощностей:

шина 1:  $-0,08$  МВт и  $-0,022$  МВА (знак «минус» означает, что мощность «входит» из внешней сети);

шина 2 и шина 4: нули, поскольку здесь нет преобразований мощности;

шина 3:  $0,07$  МВт и  $0,02$  МВА, что соответствует исходным данным для подключенной к данной шине нагрузке.

Видим, что входящая в сеть мощность несколько превышает потребляемую нагрузкой, что объясняется наличием потерь в ветвях сети.

Для линий определены входящая и исходящая активная и реактивная мощности, а также потери мощности на нагрузке, подключенной к линии 1 через шину 3, которые составляют около  $0,008$  МВт и  $0,001$  МВА. В остальных двух линиях также есть потери мощности, но они на много порядков меньше. Загрузка линии 1 составляет  $82,5\%$ , остальных – лишь тысячные доли процента.

Активная и реактивная мощности на входе трансформатора составляют со-

ответственно  $0,0795$  МВт и  $0,022$  МВА, а на выходе –  $0,078$  МВт и  $0,021$  МВА; разница между этими значениями возникает из-за потерь мощности. Напряжения на концах обеих обмоток трансформатора практически равны номинальным, а его загрузка составляет  $20,6\%$ .

Для нагрузки в качестве результатов произведенного расчета выступают ее активная и реактивная составляющие, которые, как и в исходных данных, составляют  $0,07$  МВт и  $0,02$  МВА.

Присоединение к внешней сети характеризуется активной и реактивной выходной мощностями, которые равны приведенным выше значениям мощности на входе трансформатора.

Согласно алгоритму созданной программы, далее производится вывод упрощенного изображения схемы электрической сети, которое представлено на рисунке 2.

На следующей визуализации, которая представлена на рис. 3, приведен граф отношений [11] элементов рассматриваемой в качестве примера сети.

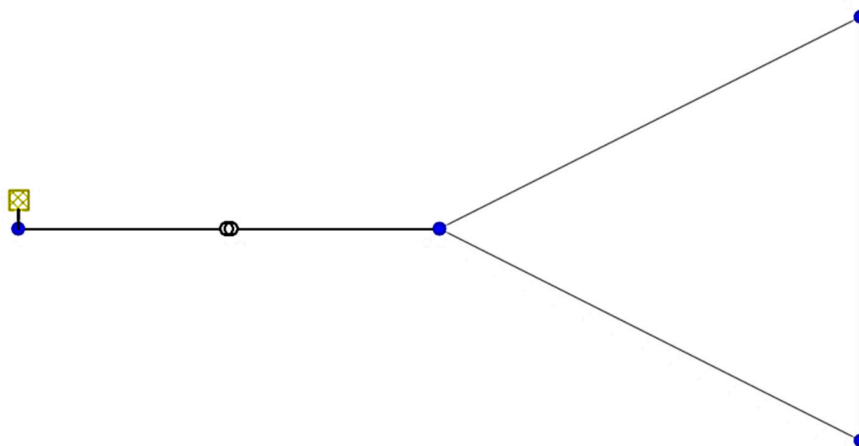


Рис. 2. Выведенное с помощью программы схематичное изображение исследуемой сети

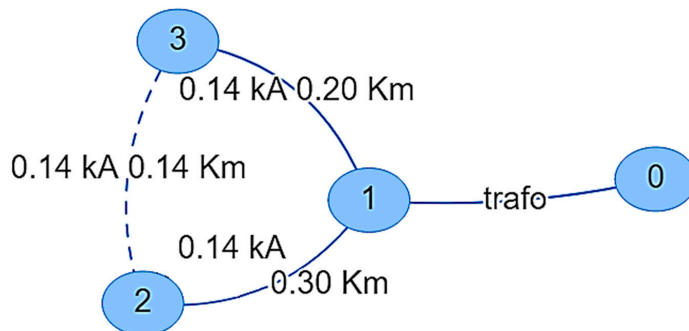


Рис. 3. Граф отношений элементов исследуемой электрической сети

В качестве узлов сети выступают 4 ее шины, а в качестве ребер – трансформатор и линии электропередач с указанными их параметрами – длиной и возникающими в них токами.

Рассмотрим теперь результаты расчета режимов короткого замыкания в сети, а именно начальные и пиковые токи короткого замыкания (КЗ) для повреждений на каждой из шин. Для шины 1 ток КЗ составляет 0,002 кА, для остальных шин – около 0,1 кА.

Максимальная мощность КЗ для всех шин составляет 0,07–0,08 МВА. Активное сопротивление КЗ для шины 1 равно 981 Ом, реактивное – 4903 Ом; для остальных шин сопротивления незначительны (2 Ом и менее).

При необходимости с помощью программы можно вывести также характеристики режима короткого замыкания по линиям электропередач и по трансформатору [12].

### Заключение

Таким образом, задачи данной работы полностью выполнены, а ее цель достигнута.

Разработанные в ходе проведения работы методика, алгоритм и программа для исследования режимов работы электрических сетей могут быть использованы в любых подобных рассмотренному случае с необходимыми доработками. Библиотека PandaPower позволяет добавлять в схемы не только использованные в примере элементы, но и огромное множество других, подробно описанных в документации к библиотеке. Топология схемы при этом может также быть абсолютно любой.

Кроме этого, пользователю предоставляется возможность самостоятельно включать в библиотеку дополнительные элементы, задавая все необходимые их характеристики.

Возможно комбинированное использование библиотеки PandaPower совместно с другими модулями для языка Python (например, созданный граф отношений элементов электрической сети можно анализировать путем его интеграции с библиотекой NetworkX).

Входные и выходные данные программы для исследования электросетей можно представлять в различных форматах, помимо рассмотренных (например, можно вывести результаты в виде файла Excel для дальнейшей статистической обработки).

Авторы планируют дальнейшее совершенствование разработанного программно-

го продукта для рассмотрения более сложных топологий электрических сетей, содержащих большое количество разнообразных составляющих. Интересной задачей будет рассмотрение влияния разных типов потребителей электрической нагрузки на характеристики сети. Еще одним перспективным направлением исследований станет разработка программы для оптимизации потоков мощности в сети.

### Список литературы

1. Кононов Ю.Г., Зеленский Е.Г., Жуков М.В. Перспективы моделирования несинусоидальных режимов электрических сетей по данным синхронных измерений в интеллектуальных сетях // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 2. С. 12-17.
2. Рамзин Н.С. Расчет установившегося режима электрической сети на примере промышленного предприятия с проверкой в ETAP 16.0 // Colloquium-Journal. 2019. № 17-2 (41). С. 99-101.
3. Vysocky J., Foltyn L., Brkic D., Praksova R., Praks P. Steady-state analysis of electrical networks in Pandapower software: computational performances of Newton–Raphson, Newton–Raphson with Iwamoto multiplier, and Gauss–Seidel methods. // Sustainability. 2022. Т. 14. № 4.
4. Ильичев В.Ю., Чухраев И.В. Обработка данных с использованием глубокого обучения генеративно-состязательной нейронной сети (GAN) // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2021. Т. 23, № 5. С. 51-56.
5. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Анализ массивов данных с использованием библиотеки Pandas для Python // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 4. С. 41-45.
6. Ильичев В.Ю., Илюхин И.Ю. Создание методик программной визуализации моделей теории графов // Научное обозрение. Технические науки. 2022. № 2. С. 16-20.
7. Бадаляя Н.П. Реализация математических моделей установившегося режима электроэнергетической системы по методу Ньютона-Рафсона // Евразийское Научное Объединение. 2019. № 1-2 (47). С. 61-64.
8. Белов Е.И. Исследование влияния параметров узлов и ветвей на сенсорность элементов электроэнергетической системы // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2018. № 2 (79). С. 88-95.
9. Виноградова А.В., Виноградов А.В., Псарев А.И., Хархардин А.Н., Лансберг А.А. Выбор количества и места установки секционирующих пунктов по критерию надежности электроснабжения // Агротехника и энергообеспечение. 2019. № 3 (24). С. 28-38.
10. Вдовин Д.В., Имелбаев Ф.Ф., Нефедова А.А. Функциональная модель контроллера ветроэлектростанции с логической схемой управления и контроля активной и реактивной мощности // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2023. № 10. С. 49-56.
11. Ильичев В.Ю., Смирнов М.Е. Использование программных средств Python для анализа распределения степеней узлов сетевых графов // Системный администратор. 2022. № 7-8 (236-237). С. 134-137.
12. Багинский Л.В., Глазырин В.Е., Журавлев П.Е. Расчетное сопротивление нагрузки трансформаторов тока мощных блоков в режиме коротких замыканий на землю // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2007. № 2. С. 14-18.