

С.П. РУТКО, студент гр. ЭПм-241 (КузГТУ)
Научный руководитель В.А. ВОРОНИН, к.т.н., доцент (КузГТУ)
г. Кемерово

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ PANDAPOWER ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Рост нагрузок в распределительных сетях сельских населённых пунктов, вызванный электрификацией и подключением новых потребителей, требует повышения надёжности и качества электроснабжения. Для решения этих задач актуально применение библиотеки pandapower, предназначенной для моделирования распределительных сетей и анализа качества электрической энергии.

Сельские сети характеризуются морально и физически устаревшим оборудованием, недостаточным запасом мощности и несоответствием современным нагрузкам. Большинство сетей спроектировано ещё в 1960–1970-х годах при расчётной норме электропотребления 1,3 кВт на домовладение, что в несколько раз ниже современных потребностей [9].

Основным источником отказов остаются воздушные линии, на долю которых приходится до 90 % нарушений электроснабжения [8]. Это связано с их протяжённостью, малым сечением проводов и применением неизолированных проводников, подверженных атмосферным воздействиям. Несмотря на внедрение СИП, их доля остаётся недостаточной.

Потребителями таких сетей выступают жилые и административные здания, а также объекты агропромышленного комплекса. Электроснабжение отличается низкой плотностью нагрузок – не более 15–20 кВт/км² [7].

Кроме того, для сельских сетей характерно неравномерное распределение нагрузок по фазам, что приводит к несимметрии напряжений: по данным измерений, отклонения превышают 5 % более чем в половине случаев [6], особенно на конечных участках линий, где наблюдаются провалы напряжения и сбои в работе оборудования [7].

Отклонения параметров качества электроэнергии от норм, установленных ГОСТ 32144–2013 и Приказом Минэнерго РФ № 690, приводят к потерям, снижению энергоэффективности и ускоренному износу оборудования.

Для анализа факторов, влияющих на качество электроэнергии, применяются методы математического и имитационного моделирования. В работе использована библиотека pandapower (Кассельский университет, Германия), объединяющая пакеты pandas и PYPOWER и обеспечивающая рас-

чѣты по стандарту IEC 60909. Она поддерживает анализ топологии, несимметричный расчѣт установившихся режимов (unbalanced power flow) и моделирование реальных объектов по паспортным данным (табл. 1).

Таблица 1

Атрибуты элементов модели электрической сети

Элемент модели	Атрибут	Описание параметра	Источник данных
Система	vn_kv	Номинальное напряжение, кВ	Схема сети
	s_sc_max_mva	Максимальная мощность короткого замыкания, МВА	Территориальная сетевая организация
	r0x0_max, x0x_max	Максимальное соотношение R_0/X_0 и X_0/X_1	Анализ питающей сети
Линия	r_ohm_per_km, x_ohm_per_km	Активное и индуктивное сопротивление прямой последовательности, Ом/км	Справочные данные, расчет по известному расстоянию между фазами
	r0_ohm_per_km, x0_ohm_per_km	Активное и реактивное сопротивление нулевой последовательности, Ом/км	Приближенный расчѣт (см. (1))
	length km	Длина линии, км	Схема сети
Двухобмоточный трансформатор	sn_mva	Номинальная мощность, МВА	Паспорт
	vn_hv_kv, vn_lv_kv	Номинальные напряжения ВН и НН, кВ	Паспорт
	vk_percent, vkr_percent	Полная и активная составляющие напряжения короткого замыкания, %	Паспорт
	vk0_percent, vkr0_percent	Полная и активная составляющие напряжения короткого замыкания нулевой последовательности, %	Расчѣт на основе справочников [2, с. 355]
	mag0_percent, mag0_rx	Намагничивающее сопротивление нулевой последовательности, отношение его активной и реактивной составляющих	Расчѣт на основе методической литературы [5, с. 115-131]
	vector_group	Схема соединения обмоток	Паспорт
	si0_hv_partial	Распределение сопротивлений нулевой последовательности по ВН	Расчѣтные данные
Нагрузка	p_mw, q_mvar, p_a_mw, q_a_mvar	Активная и реактивная мощности трёхфазных и однофазных нагрузок	Результаты замеров
	bus	Узел подключения	Схема сети
	phase_connection	Тип подключения (однофазное / трёхфазное)	Схема сети

Для расчёта удельных сопротивлений нулевой последовательности воздушных линий ($r_{0_ohm_per_km}$, $x_{0_ohm_per_km}$) использовались данные ГОСТ 28249-93, ГОСТ 839-2019 и РД 153.34.0-20.527-98. В связи с отсутствием в нормативных документах зависимостей указанных параметров от сечения нулевого провода, их значения были приближённо определены расчётным путём – путём сопоставления методов петли «фаза–ноль» и симметричных составляющих, применяемых при расчёте однофазных токов короткого замыкания, без учёта магнитных связей.

Полученное выражение для полного сопротивления нулевой последовательности воздушной линии имеет вид:

$$Z_0 = 3r_\phi - 2r_{вл} + 3r_n - j(2x_{вл} - 3x_\phi - 3x_n), \quad (1)$$

где r_ϕ, x_ϕ – сопротивления фазного провода; r_n, x_n – нулевого провода; $r_{вл}, x_{вл}$ – прямой последовательности линии.

Как отмечалось ранее, pandapower позволяет моделировать несимметричные режимы. Для демонстрации возможностей библиотеки выполнено моделирование влияния схем соединения обмоток трансформатора на коэффициенты несимметрии напряжений в асимметрично загруженной сети 0,4 кВ.

В расчёте использованы данные внешней сети 10 кВ, паспортные характеристики трансформаторов со схемами Y/Yn, D/Yn и Y/Zn, а также параметры линии 0,4 кВ и результаты измерений, подтвердившие выраженную неравномерность фазных нагрузок.

Параметры нулевой последовательности заданы по конструктивным особенностям и литературным данным [2, 10]:

- Y/Yn – токи нулевой последовательности свободно протекают через нейтраль, что увеличивает R_0 и X_0 ($R_0 \gg R_1$, $X_0 \gg X_1$);
- D/Yn – схема соединения обмоток «треугольник» ограничивает распространение токов нулевой последовательности ($R_0 \approx R_1$, $X_0 \approx X_1$);
- Y/Zn – соединение обмоток по схеме «зигзаг» компенсирует токи нулевой последовательности и выравнивает фазные напряжения ($R_0 < R_1$, $X_0 < X_1$).

Для каждой схемы соединения обмоток были рассчитаны напряжения короткого замыкания нулевой последовательности.

Реактивная составляющая определялась по формуле:

$$U_{кз0(p)} \% = \frac{\sqrt{R_0^2 + X_0^2} \cdot S_H}{U_{HH}^2} \cdot 100\%, \quad (2)$$

а активная – по выражению:

$$U_{\text{кз0(a)}}\% = \frac{R_0 \cdot S_H}{U_{\text{HH}}^2} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где R_0, X_0 – сопротивления нулевой последовательности.

Результаты моделирования несимметричных режимов сети представлены на рис. 1.

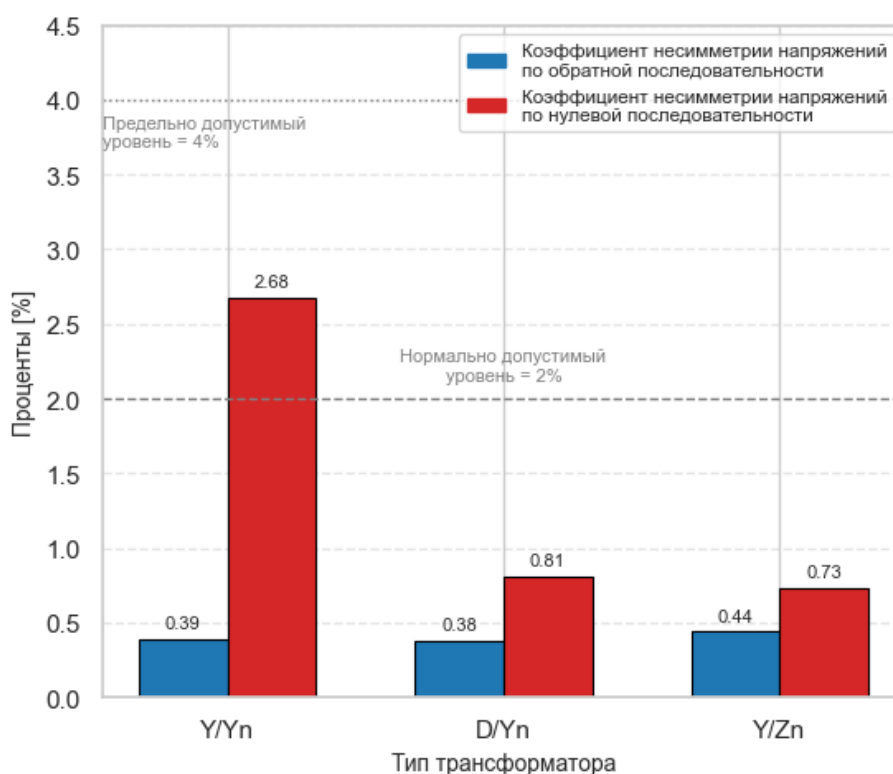


Рис. 1. Зависимость коэффициентов несимметрии напряжений от схемы соединения обмоток трансформатора

Из графика видно, что применение схем D/Yn и Y/Zn обеспечивает снижение коэффициентов несимметрии по сравнению с традиционной схемой Y/Yn, что подтверждает их эффективность для сельских распределительных сетей.

Заключение. Применение библиотеки pandapower выявило высокую эффективность при моделировании распределительных электрических сетей и анализе показателей качества электроэнергии. Реализация несимметричных расчётов обеспечивает более точное отражение режимов работы сельских сетей с неравномерной нагрузкой. Использование данного инструмента повышает достоверность результатов и может быть рекомендовано для инженерных расчётов, проектирования и модернизации систем электроснабжения.

Список литературы:

1. ГОСТ 28249–93. Короткие замыкания в электроустановках. – Введ. 1994-01-01. – Москва: Изд-во стандартов, 1994. – 28 с.
2. Григорьев, В. И. Справочная книга электрика / В. И. Григорьев, Э. А. Киреева, В. А. Миронов и др. – Москва: Колос, 2004. – 746 с.
3. Тульчин, И. К. Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий / И. К. Тульчин, Г. И. Нудлер. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 384 с.
4. Кужеков, С. Л. Практическое пособие по электрическим сетям и электрооборудованию / С. Л. Кужеков, С. В. Гончаров. – Москва, 2009. – 212 с.
5. Kulkarni, S. V., Khaparde, S. A. Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2013. – 746 p. – DOI: 10.1201/b13011.
6. Сейфуллин, А. Ю. Задачи и стратегия управления конфигурацией сельской микросети, содержащей возобновляемые источники энергии / А. Ю. Сейфуллин, А. В. Виноградов, А. В. Виноградова // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 16, № 3 (63). – С. 90–97. – DOI: 10.12737/2073-0462-2021-90-97.
7. Рощин, О. А. Обзор систем электроснабжения сельских потребителей // Инновации в сельском хозяйстве. – 2012. – № 2 (2). – С. 2–9.
8. Кудрин, Б. И. Об энергетической стратегии и энергетической безопасности России // Промышленная энергетика. – 2008. – № 12. – С. 2–7.
9. Королёв, Д. С. Обзор состояния и перспективных направлений развития сельских электрических сетей 0,4 кВ // Агротехника и энергообеспечение. – 2025. – № 1 (46). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sostoyaniya-i-perspektivnyh-napravleniy-razvitiya-selskih-elektricheskikh-setey-0-4-kv> (дата обращения: 06.11.2025).
10. Csanyi, E. 6 not-that-easy-to-understand terms related to a power transformer you should understand. – URL: <https://electrical-engineering-portal.com/power-transformer-terms#sequence-impedances> (дата обращения: 06.11.2025).

Информация об авторах:

Рутко Семен Павлович, студент гр. ЭПм-241, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, rutko.2001@mail.ru

Воронин Вячеслав Андреевич к.т.н., доцент, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, voroninva@kuzstu.ru