Несимметрия фаз и падение напряжения

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Тема объединяет физический смысл показателей и практические методы оценки систем электроснабжения.

Последовательности симметричных составляющих и расчёт сетевых отклонений

Энергия	Мощность
120 МВт·ч	85 кВт
THD	Частота
3,7%	50 Гц

УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

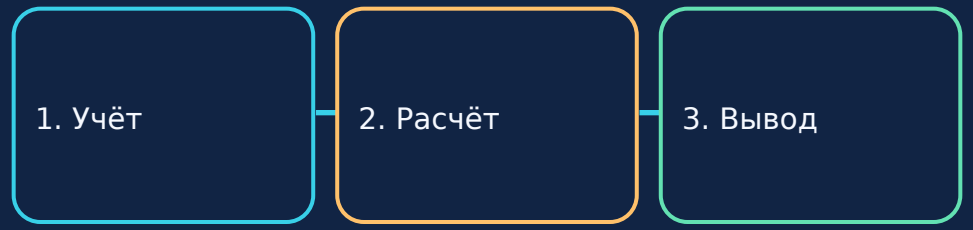
Цель лекции — перейти от определения показателей к инженерному расчёту и анализу.

Цель, задачи и ожидаемые результаты

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассмотрим ключевые понятия, расчётные формулы и возможные источники ошибок.

Описывать причины несимметрии трёхфазной сети. • Вычислять относительное падение напряжения. • Выбирать способы снижения небаланса нагрузок.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

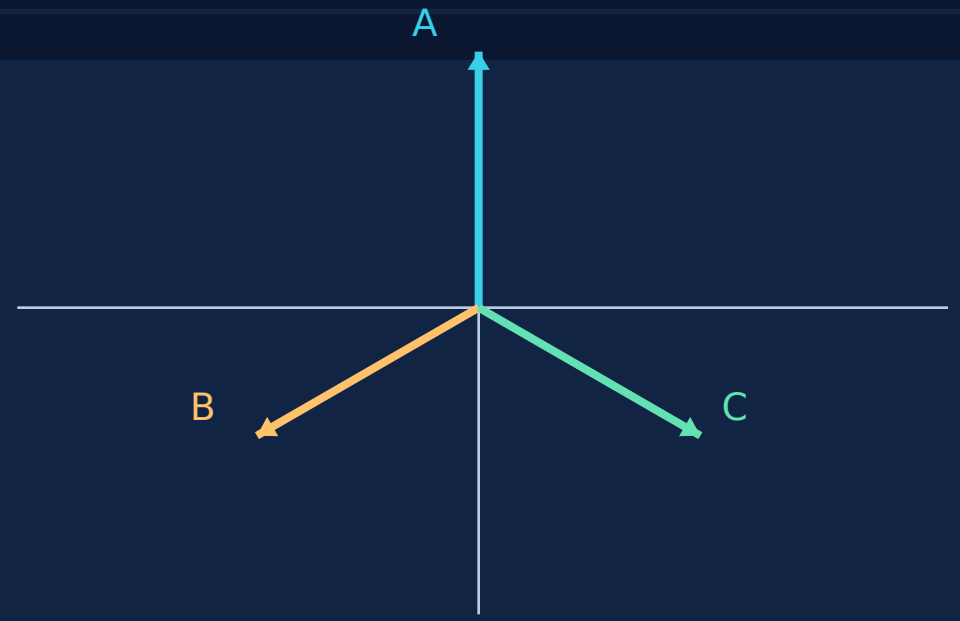
Ожидаемый результат: объяснить метод, выполнить расчёт и обосновать вывод.

Симметричная трёхфазная система

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Три фазных напряжения одинаковы по RMS и сдвинуты на 120°.

В симметричной системе фазные токи зависят от нагрузки каждой фазы.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

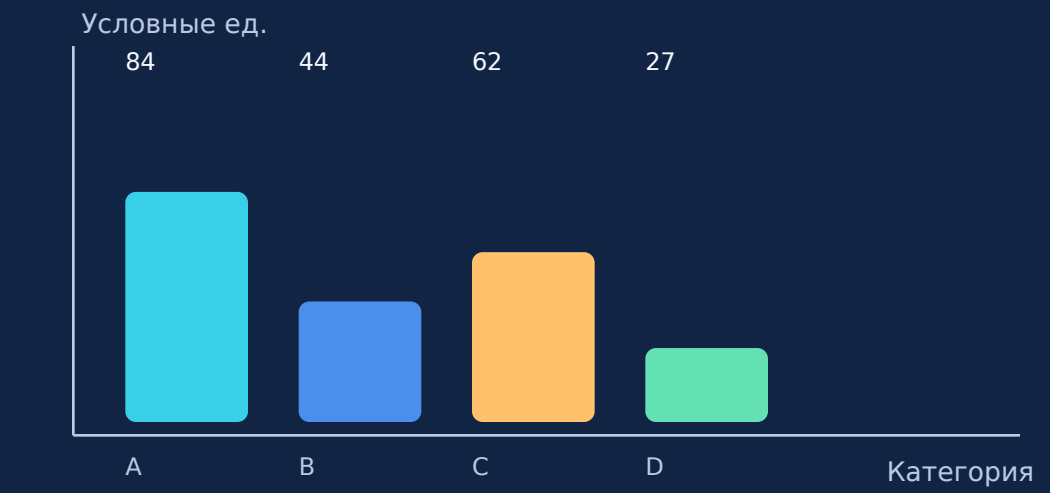
$$U_A+U_B+U_C=0$$

Причины несимметрии

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Однофазные нагрузки могут неравномерно распределяться между фазами.

Дополнительные причины — неисправности и неодинаковые параметры линий.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

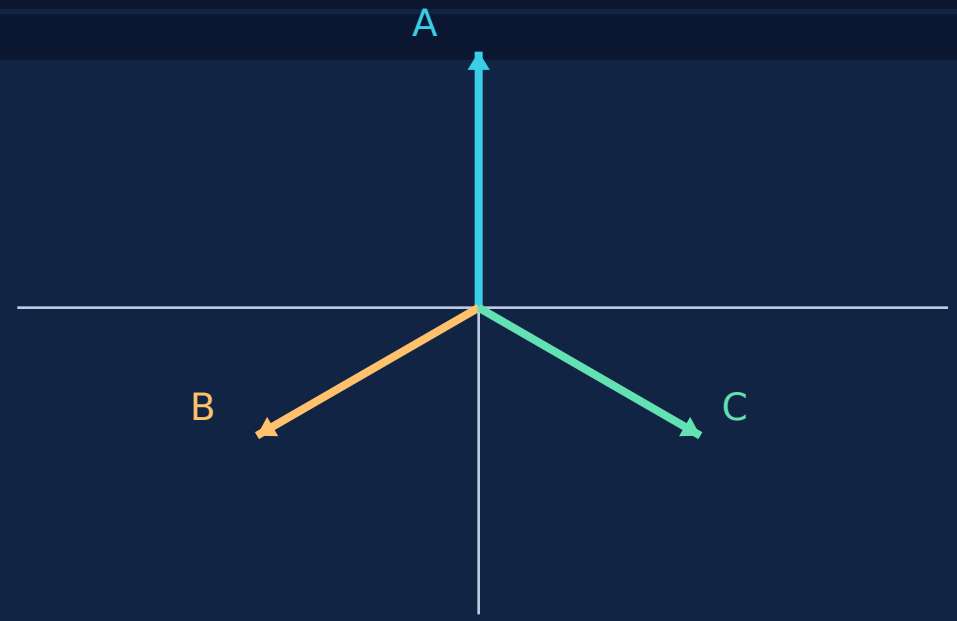
$$I_A \neq I_B \neq I_C$$

Симметричные составляющие

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Трёхфазный набор разлагают на прямую, обратную и нулевую последовательности.

Это помогает отличать характер нарушений сети.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

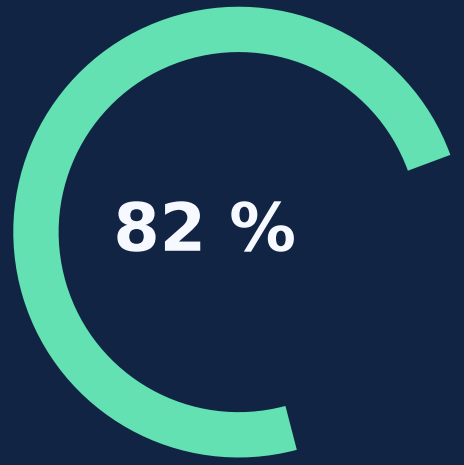
$$U = U_1 + U_2 + U_0$$

Коэффициент обратной последовательности

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Отношение RMS обратной последовательности к прямой характеризует несимметрию.

Для достоверной оценки необходимы фазовые измерения.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

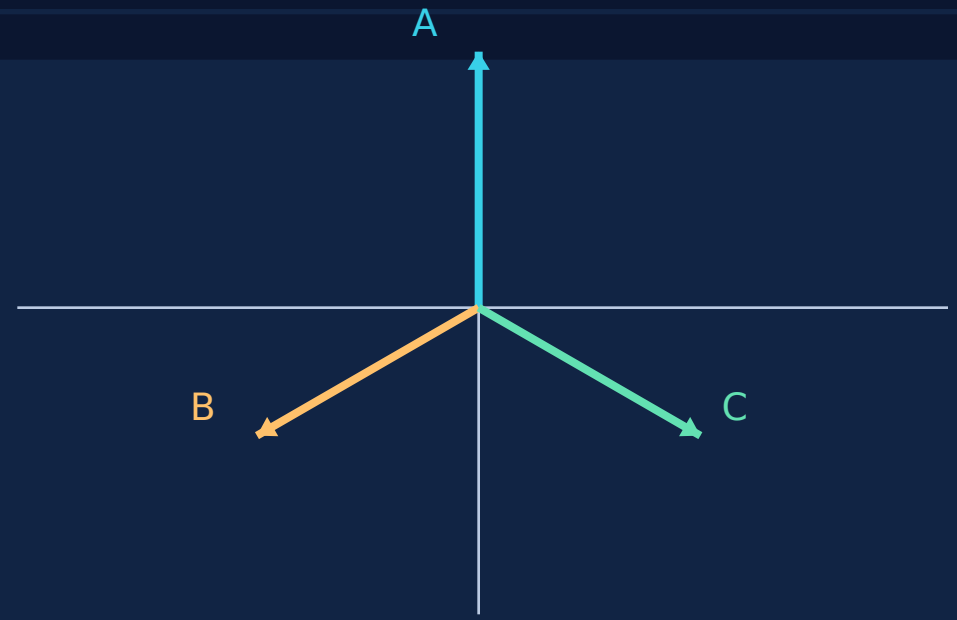
$$k_{2U} = U_2/U_1 \cdot 100\%$$

Нулевая последовательность

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Нулевая последовательность особенно важна в сетях с нейтральным проводником.

Её проявление зависит от схемы соединения и заземления.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

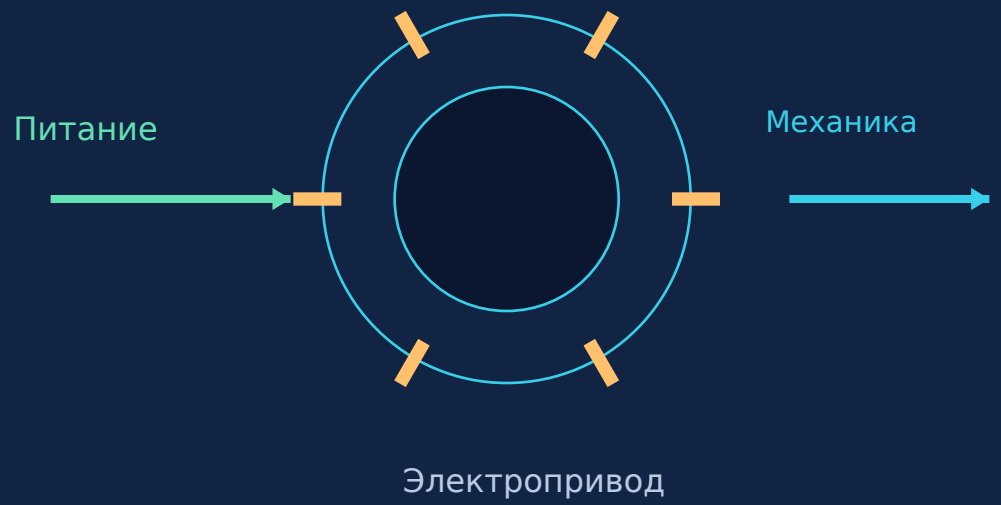
$$U_0 = (U_A+U_B+U_C)/3$$

Влияние на электродвигатели

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Обратная последовательность создаёт магнитное поле, вращающееся навстречу ротору.

Повышается нагрев и могут возникнуть пульсации момента.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

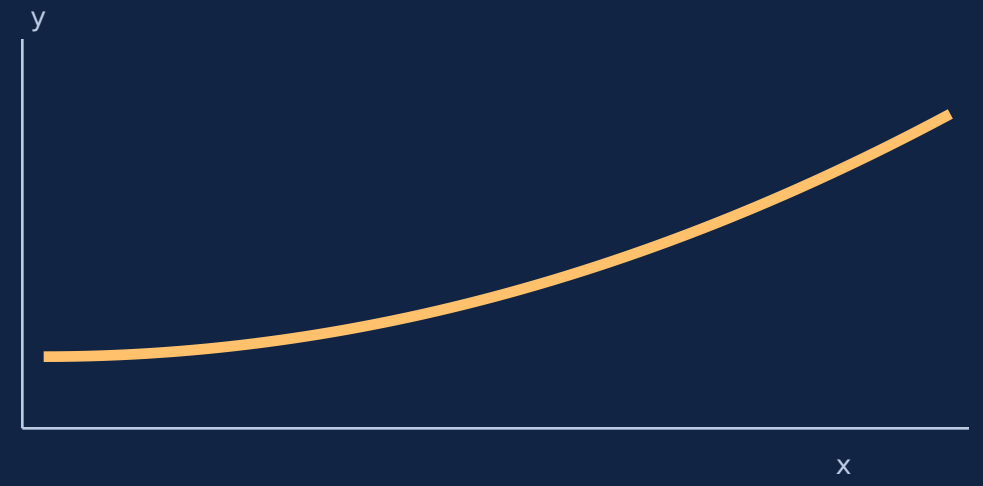
Потери ∝ I^2

Активное сопротивление линии

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Падение напряжения связано с током и комплексным сопротивлением.

Для коротких линий активная составляющая может быть существенной.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

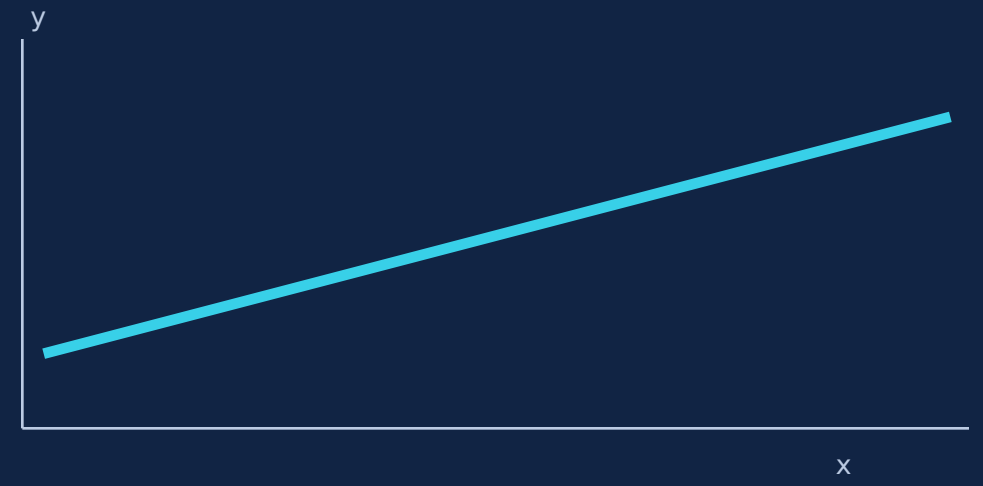
$$\Delta U_R \approx IR$$

Индуктивное сопротивление

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Реактивное сопротивление линии определяет часть изменения напряжения.

Оно заметно в сетях со значительным индуктивным током.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

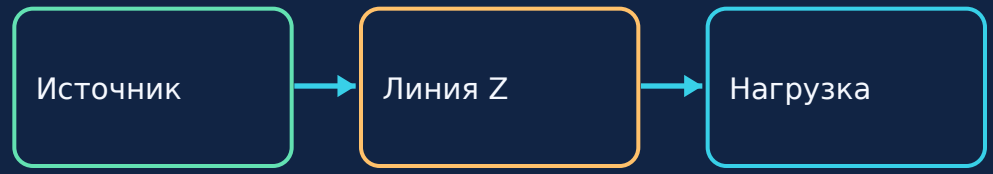
$$X_L = 2\pi fL$$

Трёхфазное падение напряжения

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для симметричной синусоидальной линии применяют приближённую формулу.

Здесь U — линейное напряжение, R и X — фазные сопротивления.



$$\Delta U = U_{нач} - U_{кон}$$

УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

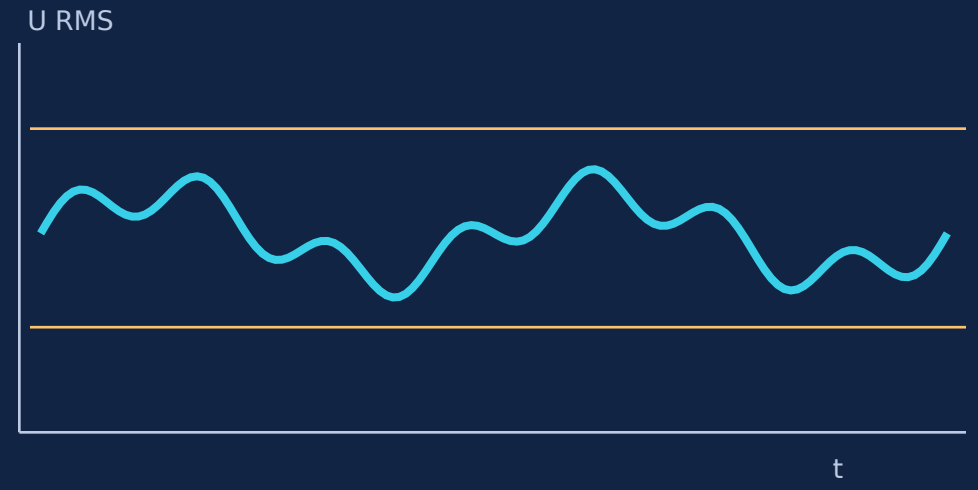
$$\Delta U_L \approx \sqrt{3} I (R\cos\varphi + X\sin\varphi)$$

Процентное падение напряжения

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Падение выражают относительно напряжения выбранной точки сети.

На стадии проектирования важно соблюдать единый базис.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

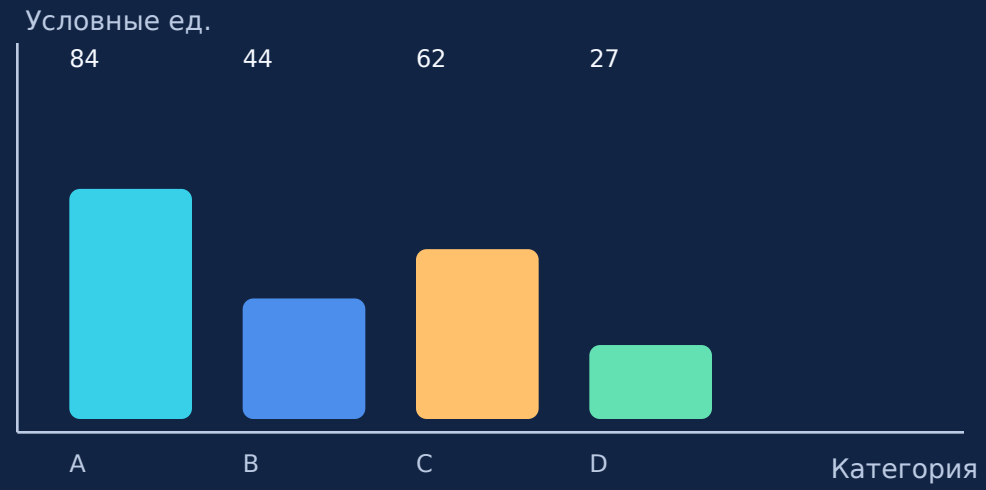
$$\Delta u = \Delta U / U_{ref} \cdot 100\%$$

Распределение однофазных нагрузок

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Перенос нагрузок между фазами уменьшает небаланс токов.

Эффект подтверждают измерениями после перераспределения.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

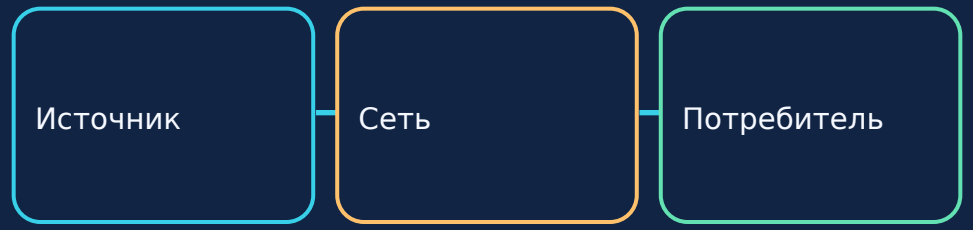
$$\min \max\{|I_A - I_B|, \ldots\}$$

Средства компенсации

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Балансировочные устройства и корректный подбор сечений улучшают режим.

Способ выбирают по реальной причине асимметрии.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

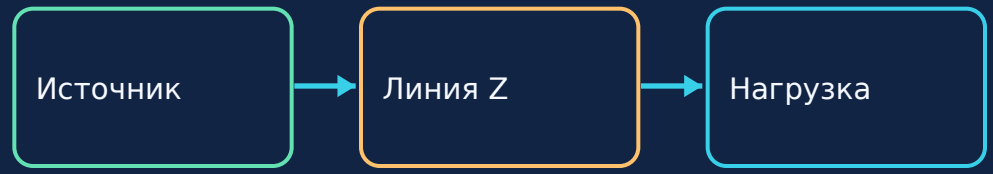
Причина → мера → контроль

Пример падения напряжения

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Трёхфазная линия: I=50 А, R=0,2 Ом, X=0,1 Ом, cosφ=0,8.

При sinφ=0,6 расчётное линейное падение равно примерно 19,05 В.



$\Delta U = U_{нач} - U_{кон}$

УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

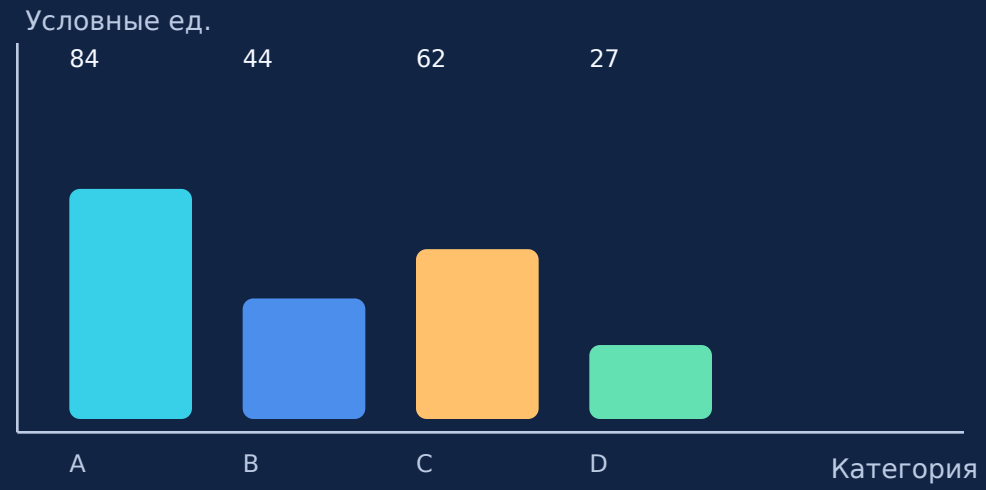
$$\Delta U \approx \sqrt{3} \cdot 50 \cdot (0{,}2 \cdot 0{,}8 + 0{,}1 \cdot 0{,}6) = 19{,}05 \text{ В}$$

Кейс: распределительный щит

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Измеряют RMS токов всех фаз и ток нейтрали при типичной нагрузке.

Затем перераспределяют однофазные потребители и повторяют измерения.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

I_A, I_B, I_C, I_N

Ключевые выводы и ограничения

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Несимметрию корректно описывают симметричными составляющими.

Падение напряжения зависит от тока, R, X и cosφ. Перераспределение нагрузок подтверждают полевыми измерениями.

- Данные
- Метод
- Результат

УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

При практическом использовании всегда проверяйте допущения, единицы измерения и методику.

Контрольные вопросы и источники

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Что такое обратная последовательность? 2. Какие допущения использует формула ΔU_L? 3. Почему важно контролировать ток нейтрали?

Основные источники: ГОСТ 32144-2013; IEC 61000-4-30:2025; Закон РК № 541-IV; профильные учебники по качеству электроэнергии.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

Для проверки соответствия нормативам используйте действующие редакции документов.