Несинусоидальность напряжения и гармоники

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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

Гармонический анализ, THD, интергармоники и влияние нелинейных нагрузок

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

УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

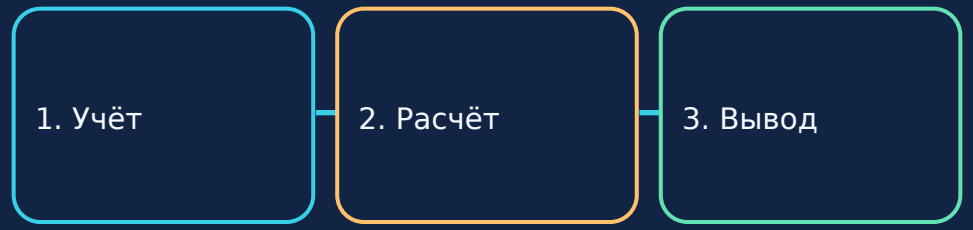
Цель лекции — перейти от определения показателей к инженерному расчёту и анализу.

Цель, задачи и ожидаемые результаты

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассмотрим ключевые понятия, расчётные формулы и возможные источники ошибок.

Объяснять появление высших гармоник. • Рассчитывать THD по RMS составляющих. • Понимать риски резонанса и нагрева оборудования.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

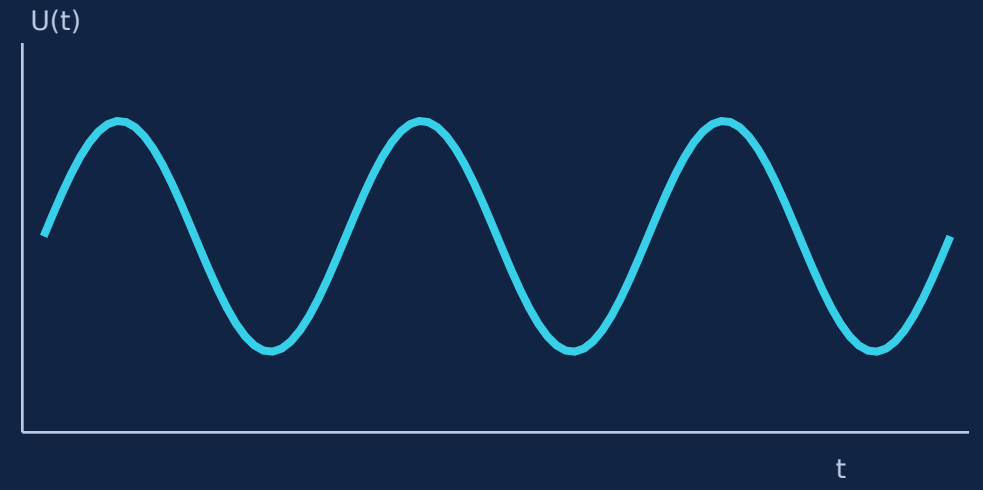
Ожидаемый результат: объяснить метод, выполнить расчёт и обосновать вывод.

Идеальная синусоида

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При линейной нагрузке и синусоидальном источнике ток и напряжение синусоидальны.

Реальные преобразователи могут нарушать эту форму.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

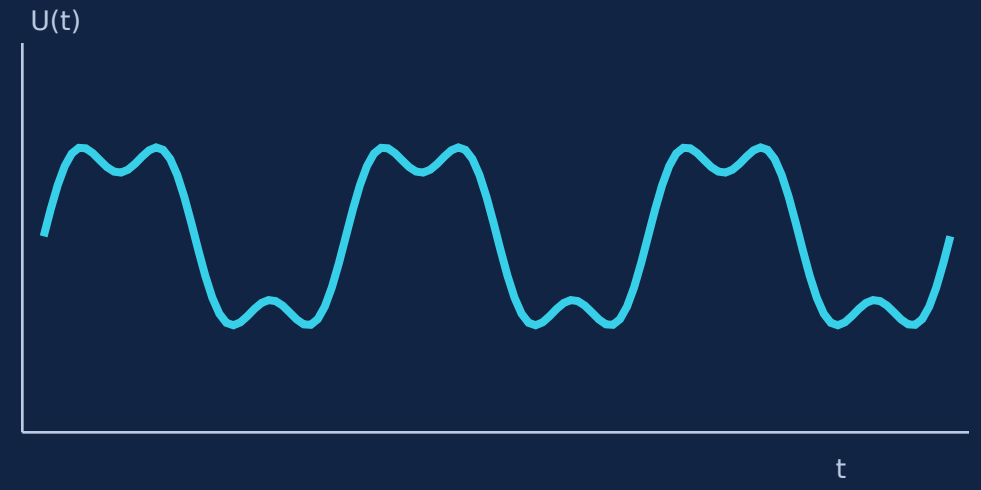
$$u_1(t)=\sqrt{2}U_1\sin(\omega t)$$

Нелинейные электроприёмники

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Выпрямители и импульсные источники питания потребляют несинусоидальный ток.

На сопротивлении сети возникают соответствующие искажения напряжения.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

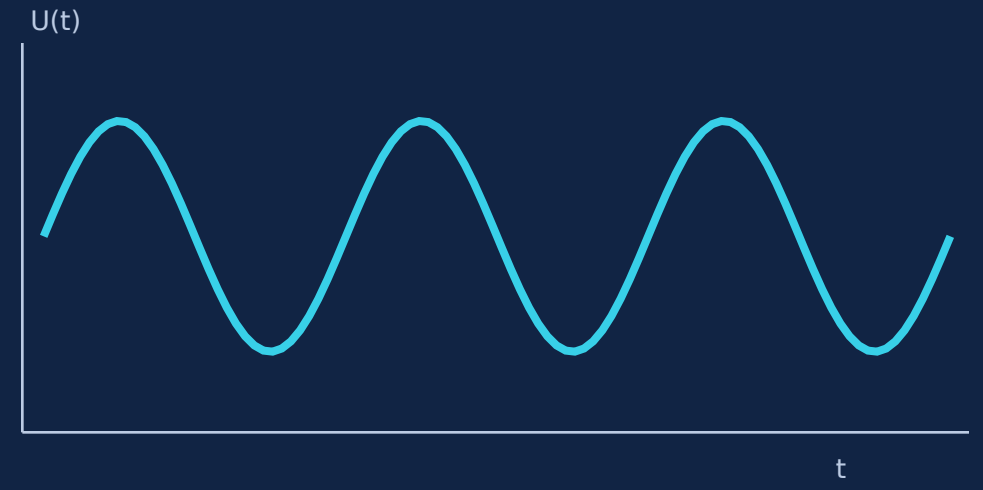
$$u_{искаж} = u_1 + \sum u_h$$

Разложение Фурье

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Периодический сигнал представляют суммой основной и высших гармоник.

Частоты гармоник кратны частоте основной составляющей.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

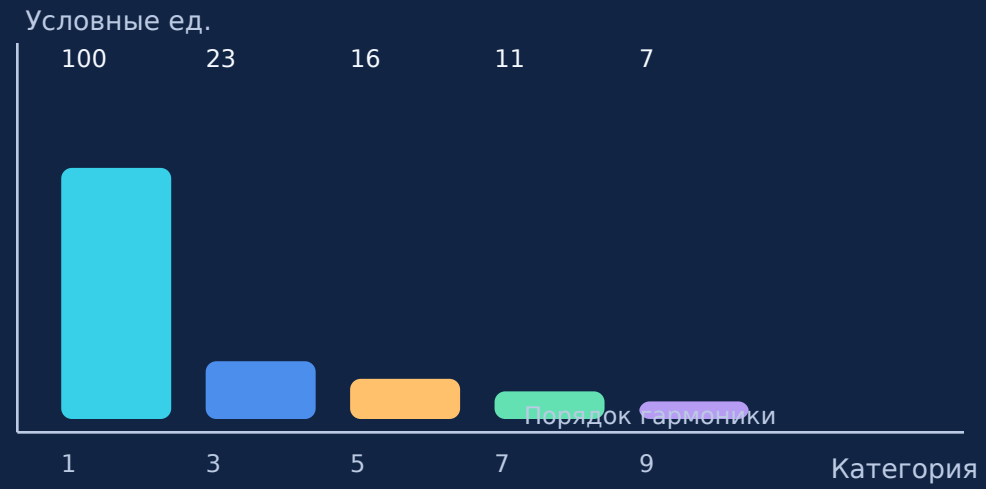
$$u(t)=\sum\sqrt{2}U_h\sin(h\omega t+\varphi_h)$$

Спектр гармоник

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Столбиковый спектр показывает RMS отдельных порядков гармоник.

Отношение спектральных амплитуд зависит от типа нагрузки.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

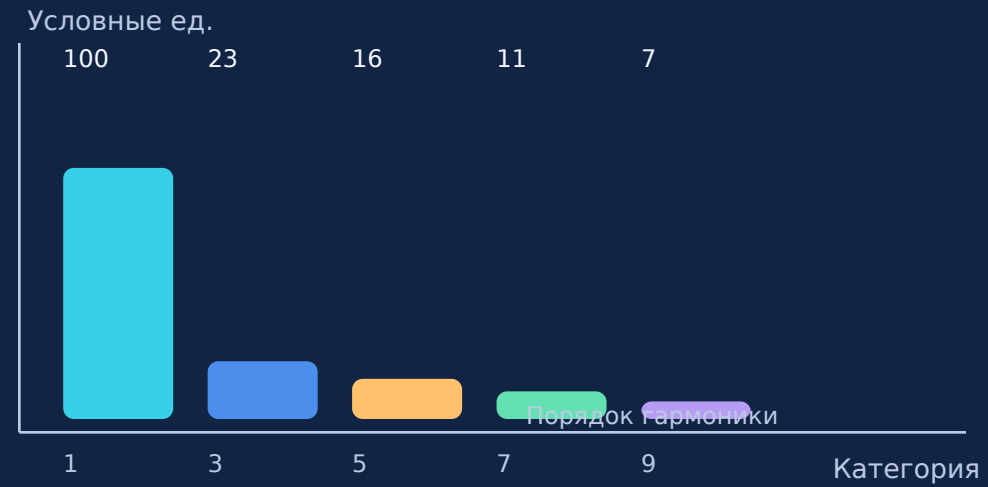
$$f_h = h \cdot f_1$$

THD напряжения

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Коэффициент THD_U вычисляют по высшим гармоникам и первой гармонике.

При расчёте используют RMS составляющих, а не мощности.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

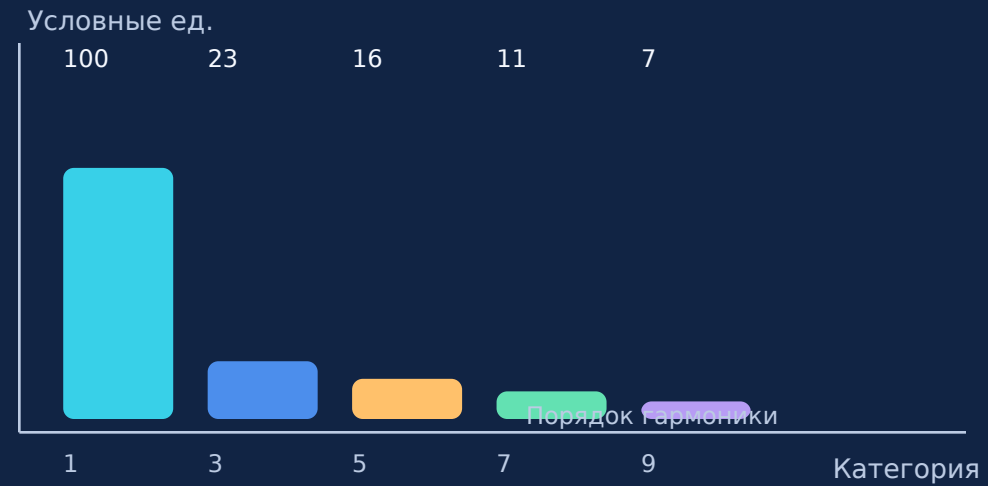
$$THD_U=\sqrt{\Sigma(h\geq 2)U_h^2/U_1\cdot 100\%}$$

THD тока

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

THD_I измеряет относительный уровень гармоник тока.

При малом основном токе его относительное значение может быть высоким.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

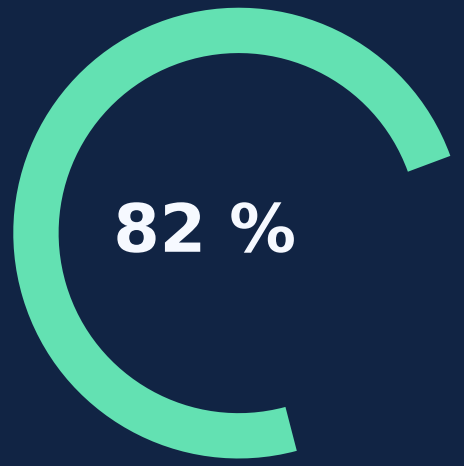
$$THD_I=\sqrt{\Sigma(h\geq 2)I_h^2/I_1}\cdot 100\%$$

Среднеквадратичное значение

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

RMS составного сигнала включает основную и высшие гармоники.

Нулевая постоянная составляющая предполагается в упрощённой формуле.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

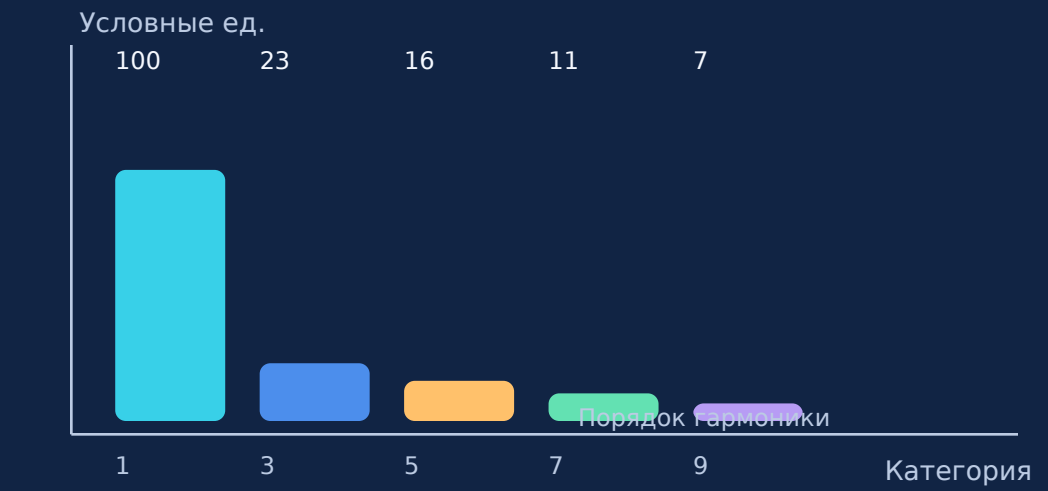
$$U_{rms}=\sqrt{(U_1^2+\sum U_h^2)}$$

Интергармоники

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Интергармоники имеют частоты, не кратные частоте основной составляющей.

Они могут появляться при частотном преобразовании и модуляции.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

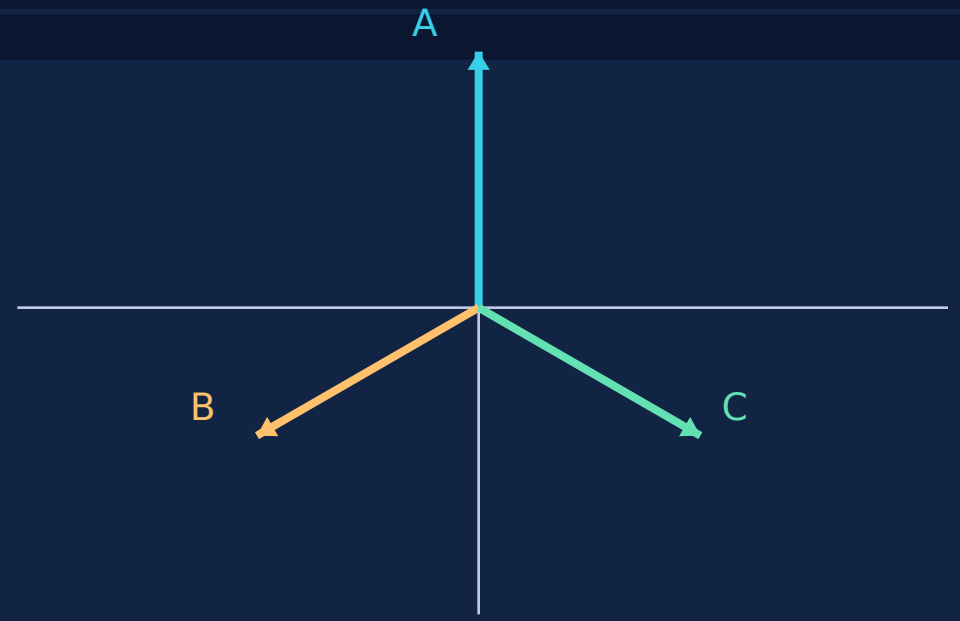
$$f_i \neq h f_1$$

Нейтральный провод

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В трёхфазных четырёхпроводных сетях гармоники нулевой последовательности могут складываться в нейтрали.

Необходим анализ гармонического состава токов фаз.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

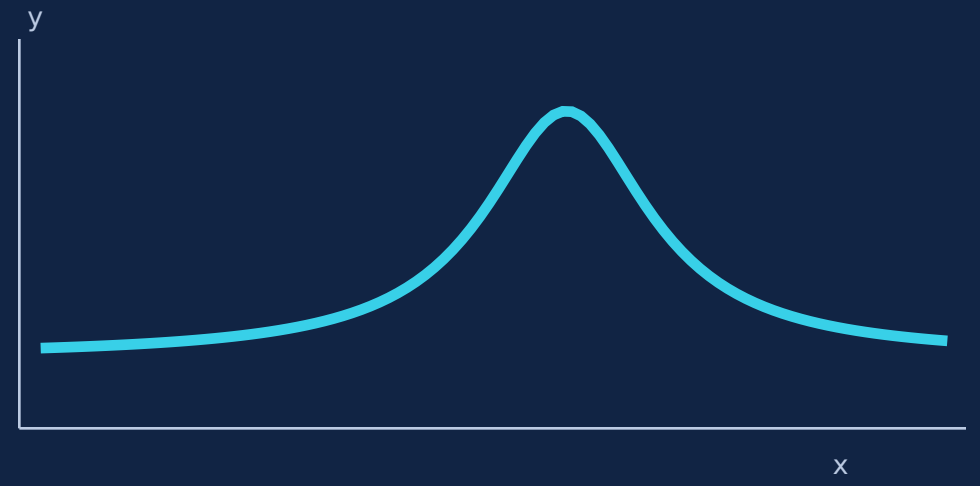
$I_{N,3} \approx 3I_3$ (идеал.)

Резонанс с конденсаторами

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Конденсаторные установки совместно с индуктивностью сети могут создать резонанс.

Перед компенсацией Q оценивают частотную характеристику сети.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

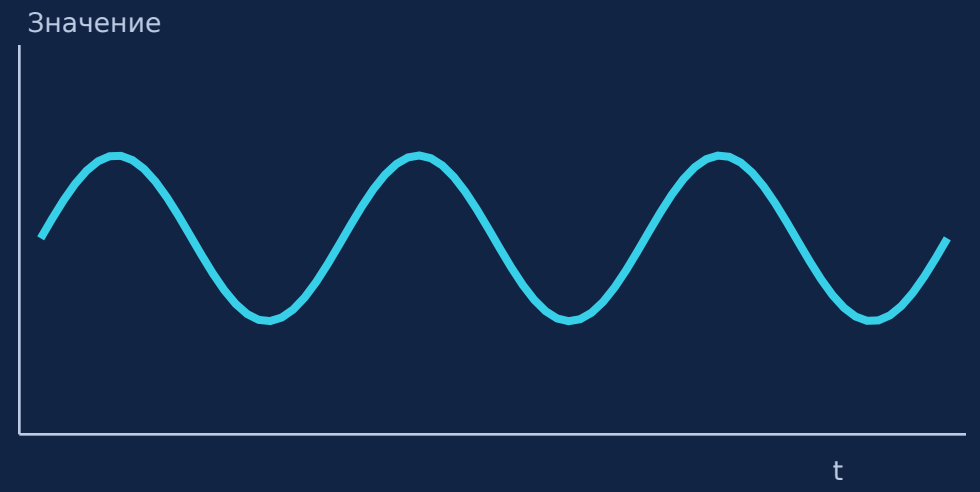
$$f_{рез} \approx 1/(2\pi\sqrt{LC})$$

Искажения и измерительные приборы

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Не каждый прибор усредняет гармоники одинаковым способом.

Методологию анализа выбирают по применимому стандарту и задаче.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

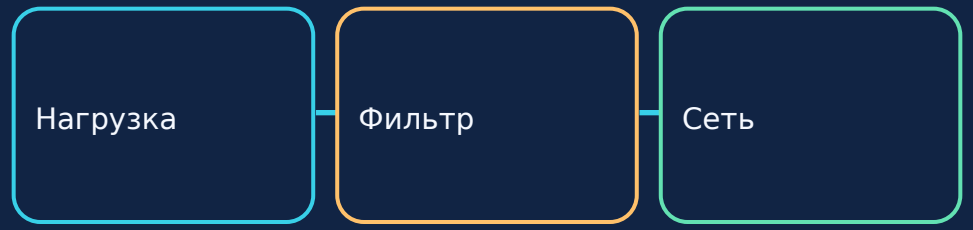
IEC 61000-4-7

Способы уменьшения гармоник

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Применяют пассивные и активные фильтры и преобразователи с улучшенным входом.

Выбор устройства обосновывают измеренным спектром.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

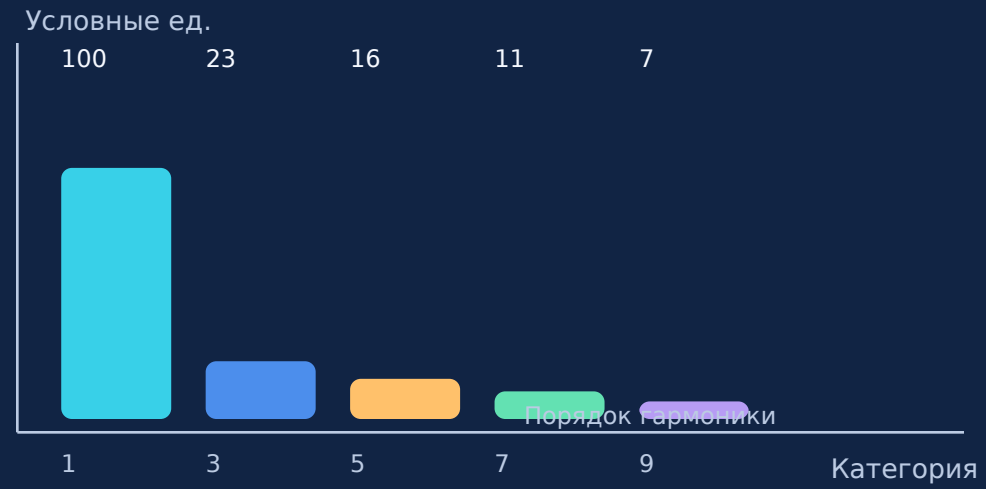
$$I_{сети} = I_{наг} - I_{фильтр}$$

Пример THD тока

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первая гармоника составляет 20 А, третья — 4 А, пятая — 3 А.

Относительное искажение тока равно 25%.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

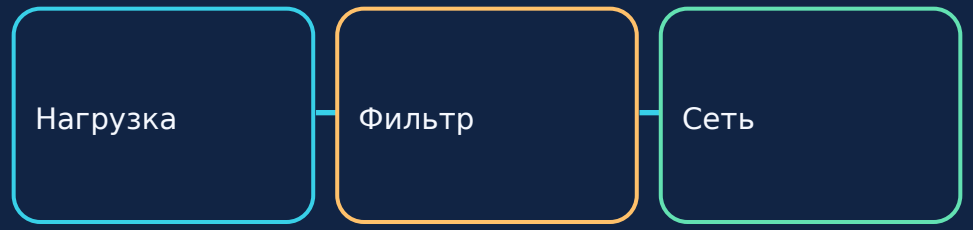
$$THD_I = \sqrt{(4^2+3^2)}/20 \cdot 100\% = 25\%$$

Кейс: частотный преобразователь

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Регистрируют осциллограмму и спектр тока на входе преобразователя.

Сравнивают режим до и после включения фильтра.



УЧЕБНАЯ СХЕМА / ИЛЛЮСТРАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

ОСНОВНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИЛИ ВЫВОД

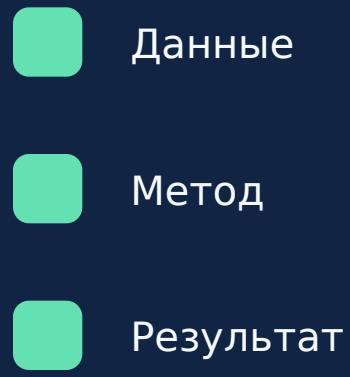
$I_h \rightarrow THD_I$

Ключевые выводы и ограничения

КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Нелинейная нагрузка является типичным источником гармоник тока.

THD — относительный показатель и не заменяет спектр. Компенсацию реактивной мощности проверяют на резонанс.



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. Как рассчитывается THD_I? 2. Чем гармоники отличаются от интергармоник? 3. Почему конденсатор может усилить гармонику?

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.