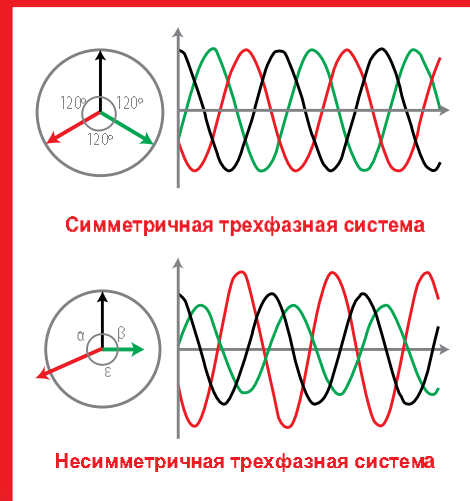
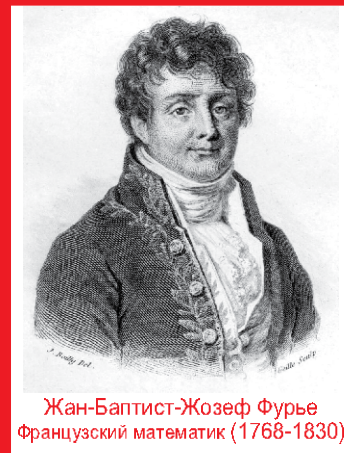


# Гармоники и качество электроэнергии



## Качество электроэнергии

Основные параметры, характеризующие любой источник электропитания, это питающее напряжение (U) и ток (I).

Стабильность напряжения (U) и способность сети обеспечить потребителей необходимым количеством электроэнергии зависит от энергоснабжающей компании.

По принятой в Испании классификации трехфазные системы электроснабжения с напряжением 400 В и частотой 50 Гц относятся к системам низкого напряжения до 1000 В. Системы с напряжениями от 1000 В до 25 кВ принято относить к классу среднего напряжения, что зависит от региона и энергоснабжающей компании.

И, наконец, системы с напряжением выше 25 кВ принято относить к классу высокого напряжения; такие уровни напряжений в основном используются при передаче электроэнергии на большие расстояния.

В настоящее время, **понятия КАЧЕСТВО (энергоснабжение без искажений) ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ и ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ (получение максимального полезного эффекта от ее использования)** должны рассматриваться как одно целое. По этой причине следует оптимизировать как потребление энергии, так и ее передачу и использование, что является гарантом правильного функционирования электрооборудования.

Наиболее важным показателем качества и энергетической эффективности энергосистемы является производство и передача максимального количества активной энергии, совершающей полезную работу. Это компенсирует колебания электрической нагрузки, а также непродуктивные нагрузки, потребляющие реактивную мощность (см. главу **«Компенсация реактивной мощности»**), и искажения формы тока и напряжения, вызываемые электрооборудованием с нелинейными характеристиками, таким как дроссели, регулируемые электроприводы, выпрямители, электронные пускатели и др.

Признаками плохого **качества** электроэнергии, в соответствии со стандартом EN-UNE-60150:1996, являются:

- Перенапряжения
- Перебои питания
- Отключения
- Колебания напряжения
- Фликер
- Просадки напряжения



# Возмущения электросети

Приведем наиболее важные типы возмущений в электрических сетях в соответствии с вышеупомянутым стандартом **UNE-EN-60150**,

## КОЛЕБАНИЯ ЧАСТОТЫ

Это изменения частоты, измеряемые в виде среднего значения за 10 секунд. Такие колебания вызывают «плавание» скорости электродвигателей, как синхронных, так и асинхронных, нарушения в работе электробытовых приборов и др.

## НЕСИММЕТРИЧНАЯ ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА

Напряжение или ток трехфазной системы является полностью симметричными, если все три фазы (R, S и T) сдвинуты по фазе друг относительно друга на  $120^\circ$ , и модули их векторов равны.

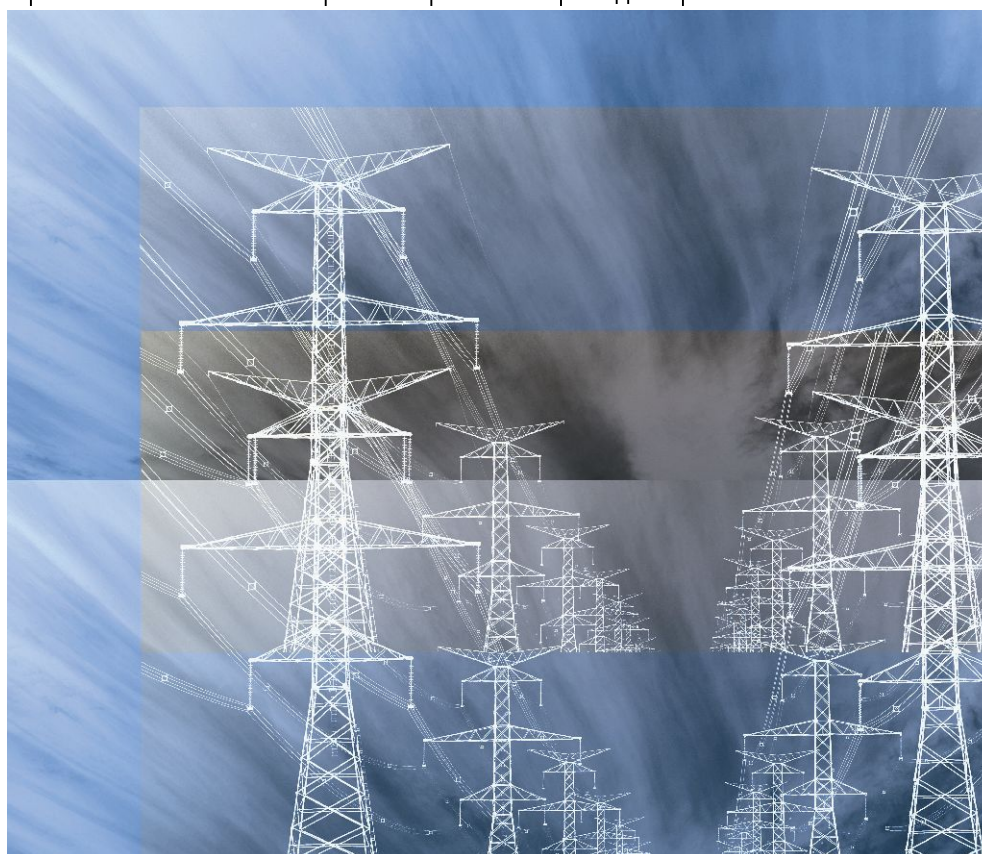
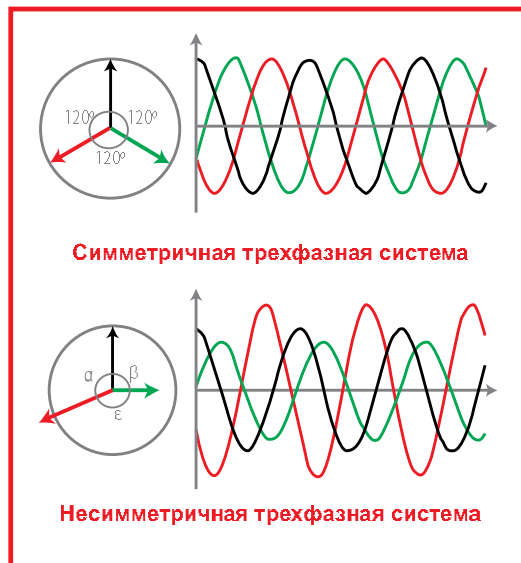
Система будет несимметричной, если модули фазных векторов будут различны, или фазовый сдвиг между двумя векторами будет отличаться от  $120^\circ$ . Более того, эти два условия могут выполняться одновременно.

Представление трехфазной системы как симметричной или несимметричной возможно при условии, что система является трех- или четырехпроводной, включая и нейтральный проводник.

Несимметричные системы не должны выходить за следующие ограничения:

- по току < 10%
- по напряжению < 3%

В несимметричных системах ток через нейтральный провод возрастает.





## Гармоники

Гармоника напряжения определяется стандартом UNEEN-60150:1996 как «синусоидальное напряжение, частота которого в целое число раз больше основной частоты питающего напряжения».

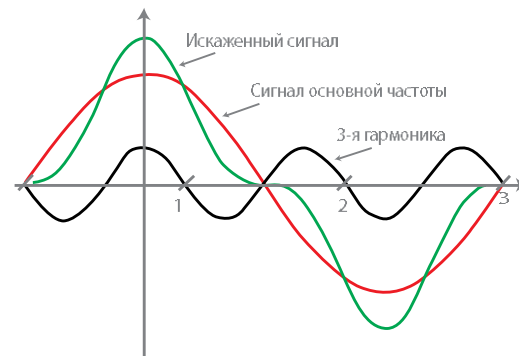
**Фурье**, французский математик, сформулировал следующий закон: «любой периодический сигнал, независимо от его сложности, можно разделить на несколько сигналов, сумма которых будет равна исходному, а частоты будут кратны его основной частоте».

Вышеприведенные определения, на наш взгляд, наиболее точно отражают физику процессов, связанных с гармониками. Здесь мы не будем подробно изучать закон Фурье, поскольку это не является целью данного руководства.

Гармоники генерируются нелинейными нагрузками. Эти нагрузки, будучи подключенными к электрической сети с синусоидальным переменным напряжением, потребляют нелинейные токи. Амплитуда и частота возникающих гармоник зависят от степени искажения формы тока. Вносимые такими нелинейными нагрузками искажения, как правило, периодические.



Жан-Баптист-Жозеф Фурье  
Французский математик (1768-1830)



### ИСТОЧНИКИ ГАРМОНИК

Среди множества источников гармоник в качестве наиболее распространенных можно выделить следующие:

- Электромагнитные и электронные балласты систем освещения
- Электросварочное оборудование
- Однофазное электрооборудование
- Электромагнитные дроссели для газоразрядных ламп
- Устройства плавного пуска
- Регулируемые электроприводы

### ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАРМОНИК НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ

- Увеличение транспортируемой мощности и снижение коэффициента мощности сети
- Несанкционированное срабатывание автоматических выключателей
- Перегрузка проводников
- Вибрации и перегрузки различных механизмов
- Возникновение нестабильностей в энергосистемах
- Ложное срабатывание устройств релейной защиты
- Снижение реактивного сопротивления конденсаторов ( $X_C = 1/\omega C$ ), что может вызвать аварийную ситуацию в автоматически регулируемых конденсаторных батареях, установленных для повышения коэффициента мощности, при появлении явления резонанса (т.е. при равенстве индуктивного и емкостного реактивных сопротивлений  $X_L = X_C$ ). Такая ситуация подробно рассмотрена в разделе **D**.
- Ошибочные показания измерительной аппаратуры
- Помехи в устройствах управления

Электросетевые компании применяют к промышленным установкам, генерирующим гармоники, штрафные санкции, по аналогии с установками, генерирующими реактивную мощность.

## Параметры гармоник

Гармоники можно классифицировать по трем параметрам: порядку (номеру), частоте и типу последовательности. Эти параметры полностью определяют свойства гармонических составляющих в электросети.

### ПОРЯДОК ГАРМОНИК

Значение основной частоты в России составляет 50 Гц, а порядок гармоники – число раз, в которое частота гармонической составляющей превышает значение основной частоты: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7... т.е. ряд натуральных чисел.

Порядок может быть определен как отношение частоты гармоники ( $f_n$ ) к основной частоте ( $f_{50}$ )

$$n = \frac{f_n}{f_{50}}$$

### ЧАСТОТА

Частота гармоники определяется путем умножения порядка гармоники на значение основной частоты (50 Гц), например:

3-я гармоника  $3 \times 50 \text{ Гц} = 150 \text{ Гц}$

5-я гармоника  $5 \times 50 \text{ Гц} = 250 \text{ Гц}$

7-я гармоника  $7 \times 50 \text{ Гц} = 350 \text{ Гц}$

Нечетные гармоники встречаются в электросетях практически всех видов: на производстве, в строительстве, промышленности, аэропортах и т.д. Четные гармоники можно обнаружить в несимметричных системах.

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ

Гармоники прямой или обратной последовательности не отличаются друг от друга по степени влияния на электрическую сеть. Они одинаково вредны, независимо от типа последовательности.

В отдельных случаях, например для конденсаторных батарей, корректирующих коэффициент мощности, наиболее вредны гармоники обратной последовательности, особенно 5-я.

Гармоники нулевой последовательности имеют частоту, кратную трем по отношению к основной частоте. Эти гармоники протекают по нулевому проводнику, и ток в нем может быть таким же по величине, как и в фазном проводе, и даже превышать его. Это приводит к перегреву нулевого провода и, соответственно, к необходимости выполнять и нулевой, и фазные проводники жилами одинакового сечения.

Основные параметры гармоник приведены в таблице:

Порядок	Частота	Последовательность
1	50	+
2	100	-
3	150	0
4	200	+
5	250	-
6	300	0
7	350	+
8	400	-
9	450	0
...	...	...
n	50·n	...

## КОЭФФИЦИЕНТ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ (U) И ТОКА (I)

Коэффициент гармонических искажений определяется как отношение (в процентах) действующего значения гармоники напряжения или тока определенной частоты к действующему значению напряжения или тока основной частоты.

$$HD U_n \% = \frac{U_{ca f_n}}{U_{ca f_{50}}} \cdot 100$$

$$HD I_n \% = \frac{I_{ca f_n}}{I_{ca f_{50}}} \cdot 100$$

### СУММАРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ: THD<sub>U</sub> - THD<sub>I</sub>

Суммарный коэффициент гармонических искажений представляет собой суммарную величину искажений, отнесенную к величине сигнала на основной частоте:

$$THD_{f_{2-n}} = \frac{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 + h_4^2 + \dots + h_n^2}}{h_1} \cdot 100$$

Для большей наглядности определим этот параметр (THD) для двух основных величин: действующего значения напряжения ( $U_{ca}$ ) и действующего значения тока ( $I_{ca}$ ).

$$THD_{U_{2-n}} = \frac{\sqrt{U_{ca2}^2 + U_{ca3}^2 + U_{ca4}^2 + \dots + U_{can}^2}}{U_{ca1}} \cdot 100$$

$$THD_{I_{2-n}} = \frac{\sqrt{I_{ca2}^2 + I_{ca3}^2 + I_{ca4}^2 + \dots + I_{can}^2}}{I_{ca1}} \cdot 100$$

Основной регламентирующий стандарт, МЭК-555, определяет нормативные значения коэффициента THD до 40-й гармоники.

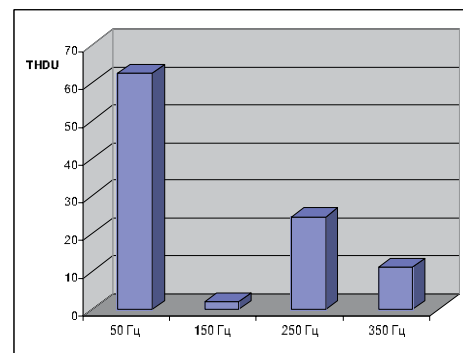
Значение суммарного коэффициента по току THD<sub>I</sub> является следствием нелинейных нагрузок в электросети.

Суммарный коэффициент по напряжению THD<sub>U</sub> является результатом протекания в сети сильно искаженного тока.

### ГАРМОНИЧЕСКИЙ СПЕКТР

Спектр гармоник формируется путем разложения сигнала на его гармонические составляющие в частотной области. Он может быть представлен в виде гистограммы, отображающей информацию о процентном содержании каждой из гармоник сигнала. Сумма сигналов гармоник дает полную форму анализируемого сигнала.

На рисунке представлен гармонический спектр, в котором 5-я гармоника составляет примерно 25% напряжения основной гармоники.



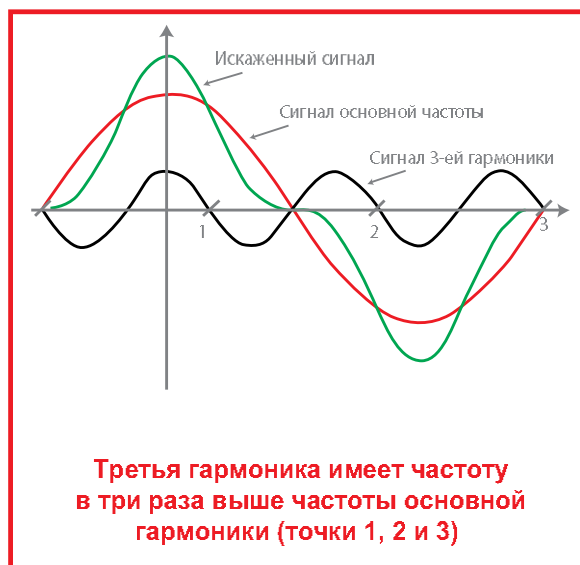
## 3-я и 5-я гармоники

### 3-Я ГАРМОНИКА

На рисунке показан сигнал искаженной формы, причем его максимальное значение равно графической сумме двух синусоидальных составляющих.

На один период сигнала основной частоты приходится три периода сигнала 3-й гармоники, причем максимумы для основной гармоники и для 3-й совпадают во времени.

Сигнал 3-й гармоники имеют важную особенность: его частота кратна сигналу основной гармоники (в электрических градусах), и он относится к сигналам нулевой последовательности. Поэтому в трехфазной четырехпроводной системе (R, S, T и N), входом которой являются три фазы (R, S и T), ток гармоники протекает в нулевом проводе (N). То же самое касается 6-й, 9-й и т.д. гармоник.

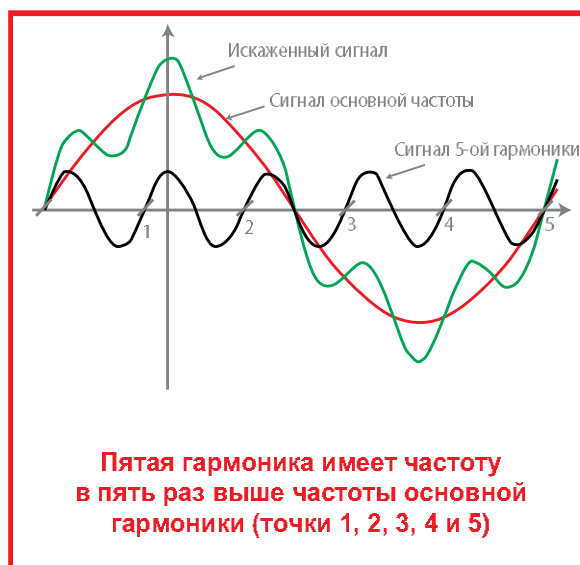


### 5-Я ГАРМОНИКА

На рисунке показана 5-я гармоника и сигнал искаженной формы. Максимальное значение искаженного сигнала равно графической сумме сигнала основной частоты и гармонических составляющих.

Как было рассмотрено ранее, на один период сигнала основной частоты приходится пять периодов сигнала 5-й гармоники, причем максимумы основной гармоники и 5-й гармоники совпадают во времени.

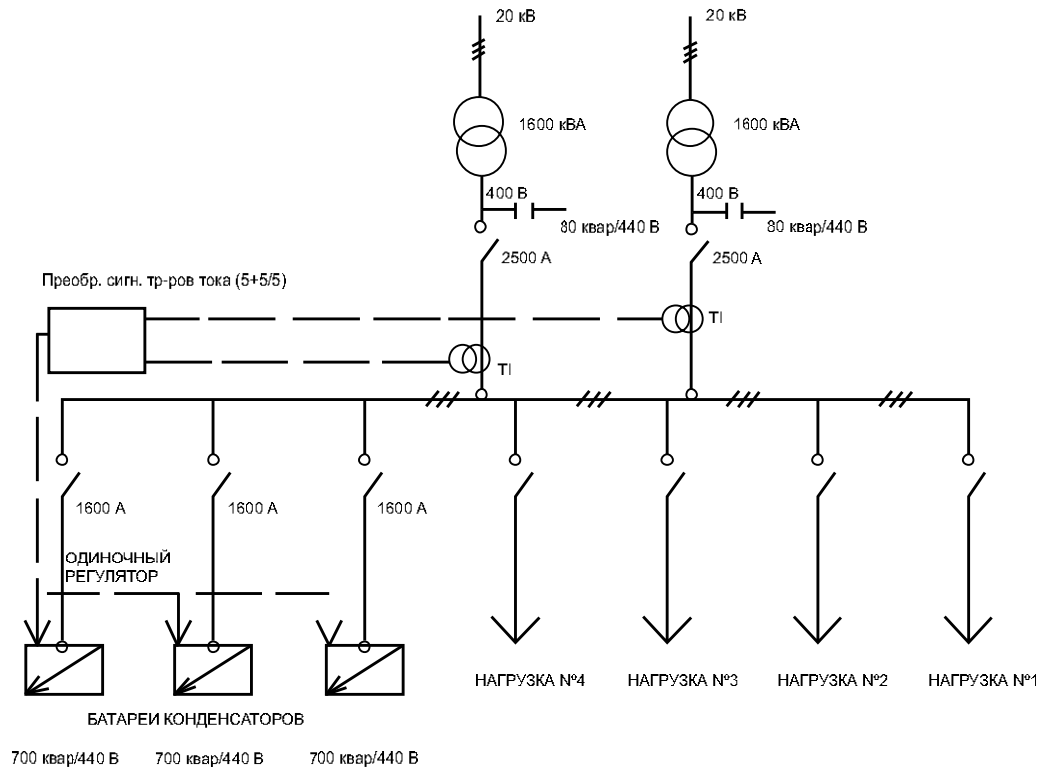
В отличие от 3-й гармоники, 5-я гармоника не является кратной (в электрических градусах) сигналу основной частоты, поэтому токи с частотой гармоники протекают по фазам R, S и T и оказывают влияние на конденсаторы и трехфазную систему, так же как и 7-я, 11-я и т.д.



В компании **RTR ENERGIA S.L.** именно эти два гармонических искажения (3-я и 5-я гармоники) считаются наиболее важными при разработке устройств коррекции коэффициента мощности для промышленного оборудования, поскольку конденсаторы в этом случае должны быть оснащены пассивными фильтрами (L-C), как показано в разделе D.

## Компенсация реактивной мощности в сетях с гармоническими искажениями

В сложных схемах, подобных показанной на рисунке, и традиционно применяемых практически на любых промышленных объектах, обычно присутствуют различные типы нагрузок (как линейные, так и нелинейные), а также конденсаторные батареи для компенсации коэффициента мощности.



В случае вероятности присутствия гармонических искажений в электросети предприятия, необходимо выполнить анализ электрической сети с помощью надлежащим образом откалиброванного сетевого анализатора.

Компания **RTR Energija S.L.** выполняет для своих клиентов по их требованию такой анализ сети с помощью соответствующим образом откалиброванных измерительных приборов.

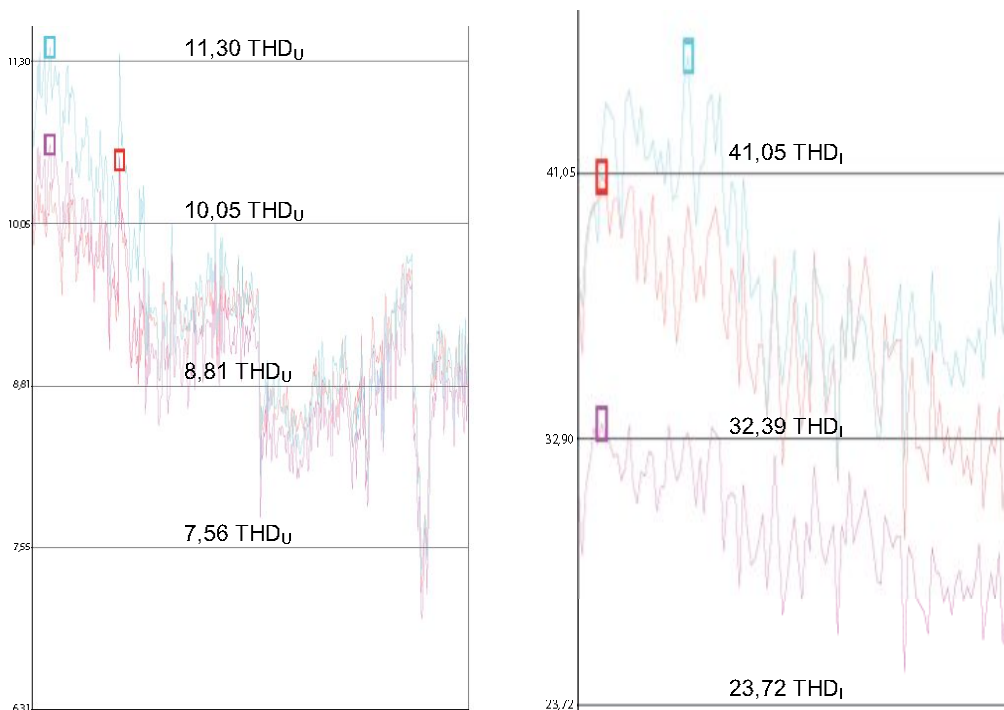
По завершении такого анализа, который занимает примерно 4-5 дней, включая выходные, будет получена необходимая информация для выявления требований к фильтрокомпенсирующему устройству.

- Питающее напряжение " $U_{ca}$ "
- Ток " $I_{ca}$ "
- Частота
- Мощность установки
- Коэффициент мощности
- Емкостная энергия, требующаяся для установки
- Ток в нулевом проводнике
- Несимметрия, обусловленная нагрузкой
- Коэффициент гармонических искажений по напряжению  $THD_U$  для 3-й, 5-й, 7-й ... гармоник (суммарный и отдельно для каждой гармоники)
- Коэффициент гармонических искажений по току  $THD_I$  для 3-й, 5-й, 7-й ... гармоник (суммарный и отдельно для каждой гармоники)
- Преобладающая гармоника в сети по напряжению и по току.

Иногда для определения гармонического состава, необходимого для оптимального выбора конденсаторной батареи для конкретной электроустановки, бывает достаточно краткосрочного анализа.

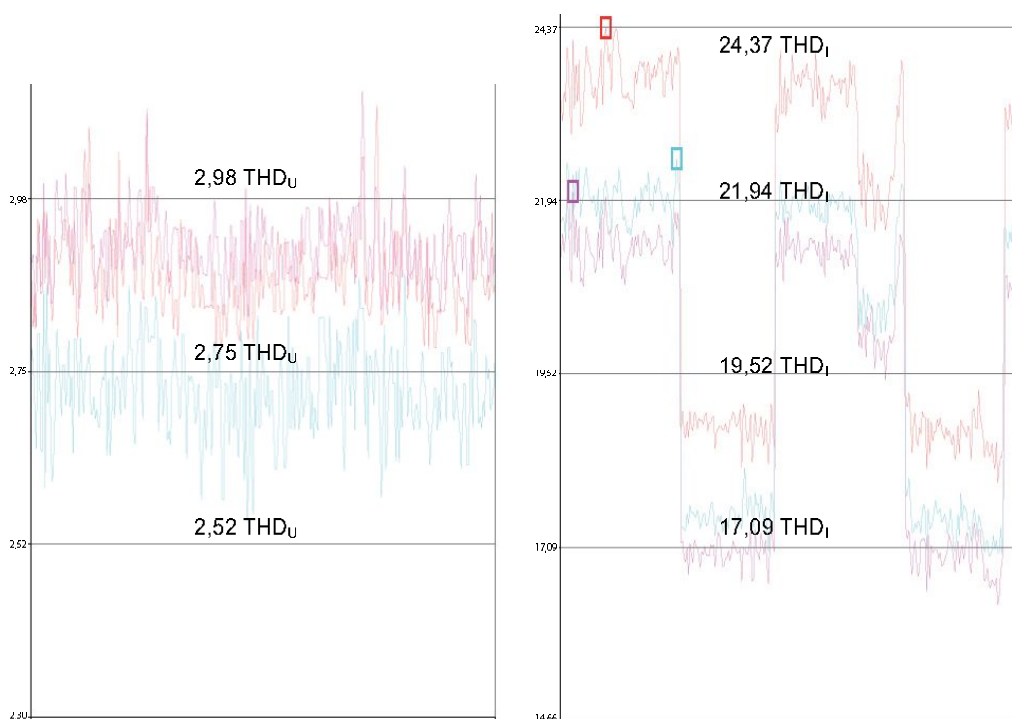
Далее приведем несколько примеров:





Сетевой анализатор дает информацию о спектре гармонических искажений напряжения ( $\text{THD}_U$ ) и тока ( $\text{THD}_I$ ). Очевидно, искажения весьма значительны, и, как будет показано далее, было принято решение об установке конденсаторной батареи для компенсации реактивной мощности и размещении пассивных фильтров с коэффициентом отстройки 14%.

В данном примере наличие гармонических искажений заметно невооруженным глазом, даже не смотря на весьма непродолжительный период наблюдения. Но в следующем примере ситуация несколько иная.



В этом случае коэффициенты гармонических искажений напряжения ( $\text{THD}_U$ ) и тока ( $\text{THD}_I$ ) находятся в допустимых пределах, поэтому устанавливаемая батарея конденсаторов может быть выполнена на базе усиленных конденсаторов RTF (из каталога компании **RTR Energía S.L.**), или же может быть установлен пассивный фильтр с коэффициентом отстройки 7%. Чтобы принять правильное решение, необходимо выполнить анализ параметров сети в течение более длительного времени, чтобы иметь возможность проследить за изменением гармонического состава токов и напряжений.

## ГАРМОНИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

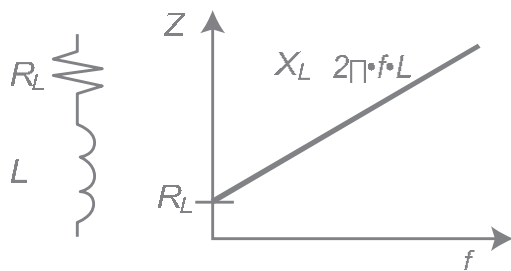
Явление резонанса возникает при равенстве емкостного и индуктивного реактивных сопротивлений  $X_L = X_C$  в параллельной или последовательной цепи с нелинейными нагрузками, конденсаторами или индуктивными нагрузками.

$$\left. \begin{array}{l} X_L = \omega \cdot L \\ X_C = 1/\omega \cdot C \end{array} \right\} \Rightarrow \omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

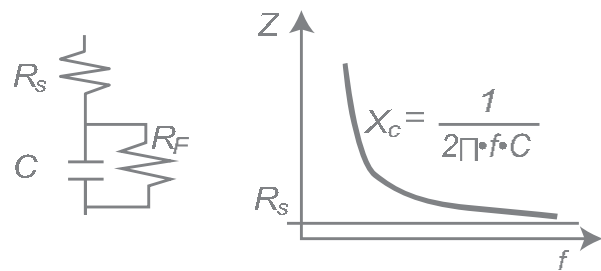
Значение частоты, на которой имеет место равенство емкостного и индуктивного реактивных сопротивлений, называется резонансной частотой  $f_R$ .

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \Rightarrow 2\pi \cdot f_R = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \Rightarrow f_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C}}$$

Оба реактивных сопротивления зависят от частоты ( $f$ ), но индуктивное сопротивление  $X_L$  имеет прямо пропорциональную зависимость, тогда как емкостное сопротивление  $X_C$  обратно пропорционально частоте. Поэтому с ростом частоты значение реактивного емкостного сопротивления  $X_C$  уменьшается, а реактивного индуктивного сопротивления  $X_L$  увеличивается.



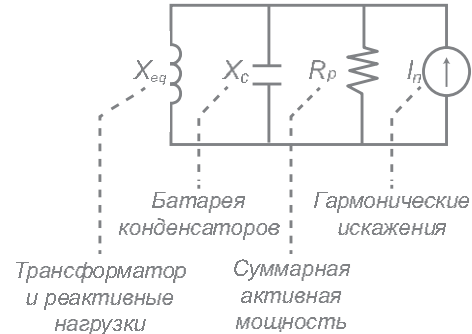
**Реактивное сопротивление катушки индуктивности**



**Реактивное сопротивление конденсатора**

Обычно конденсаторы в промышленных установках соединены параллельно, как показано на эквивалентной схеме.

Такая схема выполняет роль делителя тока, и если значение емкостного сопротивления  $X_C$  будет наименьшим, большая часть тока будет протекать через конденсаторы. **Именно это может стать причиной повреждения конденсаторов.**

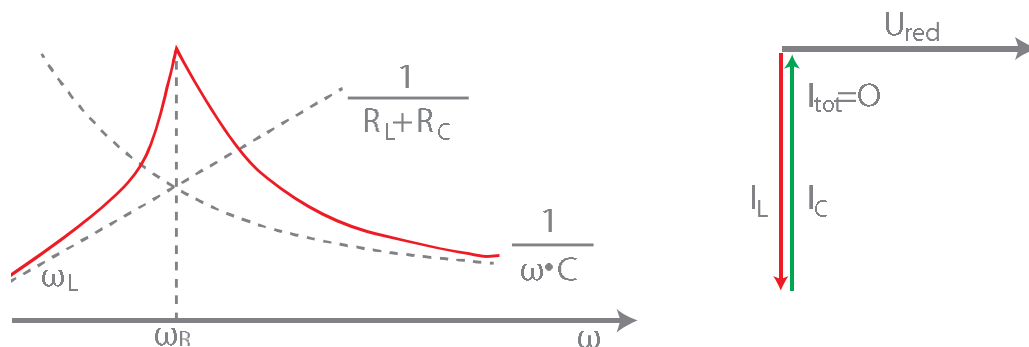


## ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ РЕЗОНАНС

Резонанс в параллельной LC-цепи наступает, когда результирующий ток и напряжение совпадают по фазе. Это происходит при определенном значении частоты, называемом «резонансной частотой», например на частоте  $\omega_R = 150$  Гц (частота 3-й гармоники). Эта цепь имеет индуктивный характер при  $\omega < \omega_R$ , при этом ток отстает по фазе, т.е. напряжение будет опережать ток. Если цепь имеет емкостной характер ( $\omega > \omega_R$ ), то ток будет опережать напряжение.

В LC-цепи, результирующий ток катушки индуктивности ( $L$ ) равен току конденсатора ( $C$ ), но противоположен ему по знаку, поэтому алгебраическое и векторное суммирование дают в результате максимальное значение сопротивления и нулевое значение суммарного тока (в отличие от последовательного соединения).

В этих условиях ток в обеих ветвях LC-цепи будет слишком большим, что очень опасно для конденсатора, поскольку значение его емкостного сопротивления будет наименьшим.



Из графика хорошо видно, как увеличивается значение полного сопротивления до своей максимальной величины.

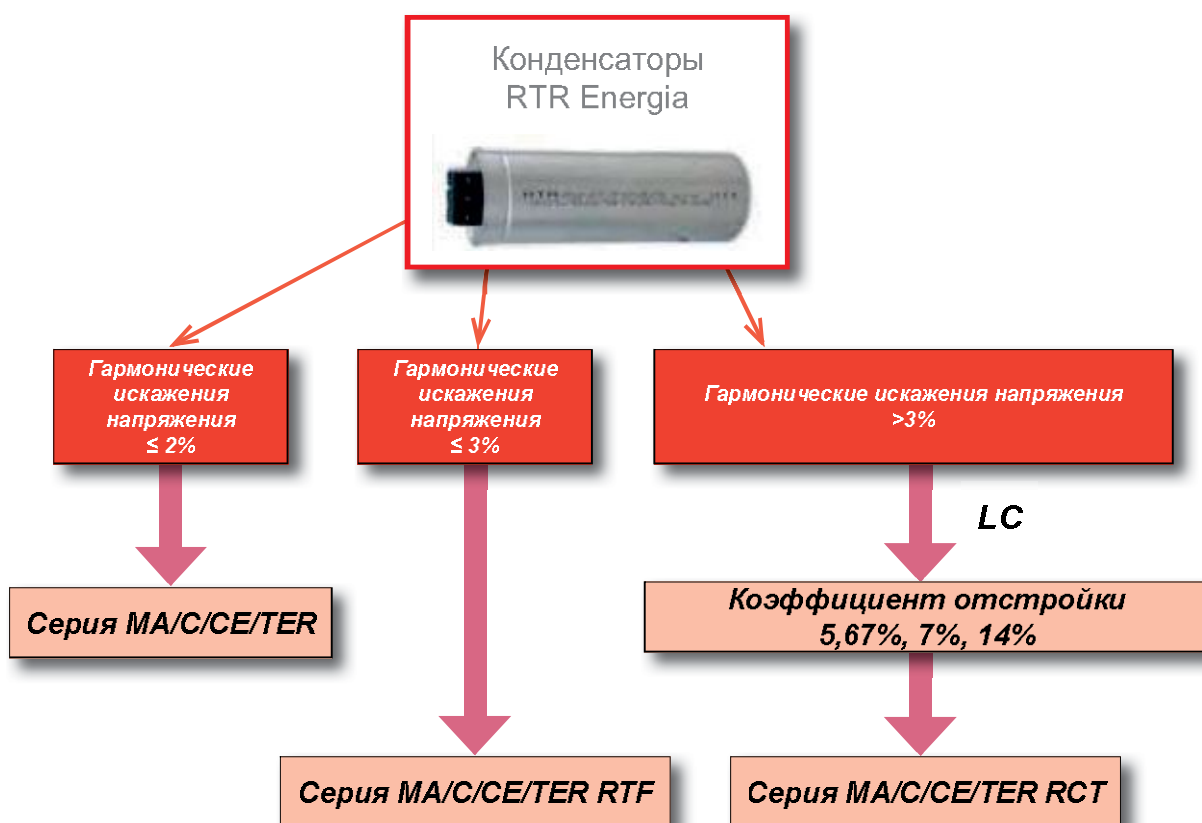
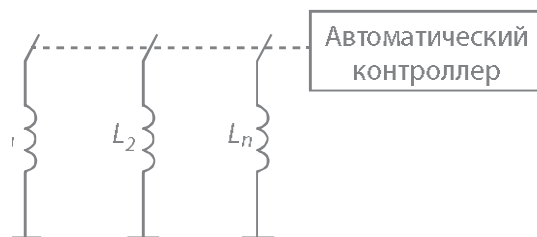
Поэтому конденсаторы, установленные параллельно с сетью с высоким содержанием гармоник, должны быть обязательно защищены.

Если промышленная установка с сильной эмиссией гармоник запитана от силового трансформатора (понижающего), компенсирующие конденсаторы необходимо устанавливать со стороны трансформатора, чтобы защитить их от действия гармоник (см. раздел **Г** главы «Компенсация реактивной мощности»).

### ЗАЩИТА КОНДЕНСАТОРОВ

При наличии гармонических искажений для защиты конденсаторов можно использовать пассивный (LC) фильтр. Такая фильтрация рекомендована стандартом UNEEN-61642 и, исходя из практического опыта компании **RTR Energia S.L.**, установка LC-фильтров требуется в оборудовании с искажениями по напряжению на 5-й гармонике, превышающими 3%, а также с искажениями по току на 5-й гармонике, превышающими 30%.

Компания **RTR Energia S.L.** выпускает два класса конденсаторов: **Стандартные**, способные выдерживать гармонические искажения по напряжению менее 2% и по току менее 25%, и **Повышенной прочности**, способные выдерживать гармонические искажения по напряжению менее 3% и по току менее 30%.

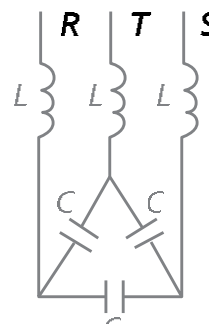


## Заграждающие пассивные фильтры

Задача заграждающего (режекторного) фильтра состоит в предотвращении усиления преобладающей гармоники (главным образом, 5-й гармоники тока или напряжения), а также воспрепятствование параллельному резонансу между индуктивной нагрузкой "L" (трансформаторы, электродвигатели и т.д.) и конденсаторами "С", чтобы избежать перегрузок и возможного повреждения автоматической батареи конденсаторов, компенсирующей реактивную мощность.

Фильтр имеет каскадную структуру, предварительно рассчитывается и настраивается, и состоит из:

- Трех однофазных катушек индуктивности.
- Трех однофазных конденсаторов требуемой мощности (в квар).



Это устройство называют также **компенсационной цепью**, и каждая цепь должна быть разработана с соблюдением необходимых требований защиты.

Различные LC-цепи образуют автоматически управляемую батарею конденсаторов, которая выступает в роли полноценного фильтра, выполняя задачу компенсации коэффициента мощности, причем суммарная мощность фильтра равна сумме мощностей всех его ветвей.

### ВЫБОР БАТАРЕИ КОНДЕНСАТОРОВ (L-C)

В процессе анализа гармонического состава напряжений и токов в электросети определяется преобладающая гармоника, в качестве которой часто выступает 5-я гармоника (с частотой 250 Гц).

Установив значение частоты преобладающей гармоники, далее определяют значение резонансной частоты фильтра ( $\omega_r$ ), причем она ни при каких условиях не должна быть кратной частоте основной гармоники (50-60 Гц). Кроме того, значение резонансной частоты должно быть меньше частоты преобладающей гармоники, чтобы исключить возможность резонанса на частоте гармоник.



Резонансная частота ( $\omega_r$ ) определяется через коэффициент перенапряжения (отстройки) (p%), который связан и с напряжением на конденсаторе, и на катушке индуктивности.

$$p(\%) = 100 \cdot \frac{U_{C_c} - U_L}{U_L} = 100 \cdot \left( \frac{\omega_{red}}{\omega_{резонансная}} \right)^2 = 100 \cdot \left( \frac{f_{red}}{f_{резонансная}} \right)^2$$

Компания **RTR Energía S.L.** выпускает свои собственные конденсаторы с соответствующими пассивными фильтрами, способными выдерживать перенапряжения до 15%. Например, конденсатор на 440 В с установленной расстраивающей индуктивностью при  $p(\%)=7$  способен выдержать значение напряжения:

$$440 \cdot 1,07 \cdot 1,15 = 540 \text{ В}$$

THDu	p(%)	f тока	f резонансная
3-7%	7	50 Гц	189 Гц
		60 Гц	227 Гц
>7%	14	50 Гц	134 Гц
		60 Гц	160 Гц