

## Электрическая цепь. Линейные и нелинейные электрические цепи и нагрузки. Высшие гармоники и интергармоники. ЭФФЕКТЫ ГАРМОНИК В НЕЙТРАЛИ.

### Отечественные термины

Электрической цепью называют совокупность соединённых друг с другом источников эл энергии и нагрузок, по которым может протекать электрический ток

Линейной цепью называется цепь, все элементы которой – резистивные, индуктивные, ёмкостные – линейны, то есть не зависят от величины тока в цепи.

Замечание: не путать этот термин с таким же термином в математике. Термин «линейный элемент» не означает что его ток и напряжение являются функциями зависящими линейно согласно мат. определения. [10]

Пример: "...периодические несинусоидальные токи ...возникают...когда источник ЭДС даёт несинусоидальную ЭДС, а все элементы цепи (все нагрузки) – резистивные, индуктивные и ёмкостные – линейны т.е. от тока величины (т.е. величины L,C, R) не зависят" [10] То есть термин «линейность» характеризует только сопротивление (активное R или реактивное L,C) и не связан с формой тока или напряжения.

Итого:

**Линейная нагрузка** – это нагрузка содержащая только линейные элементы то есть R L C\* не зависящие от тока, например лампа накаливания или фазный конденсатор имеют примерно стабильные R, C не зависящие от (величины) тока.

**Нелинейная нагрузка** – это нагрузка содержащая нелинейные элементы то есть элементы сопротивление которых (R, L, C) зависит от тока (т.е. от его величины и направления) или от напряжения в цепи этой нагрузки, например диод при положительном токе имеет  $R \sim 0$ , а при отрицательном токе  $R \sim \infty$ .

Термин отечественный правильный и при условии синусоидальности напряжения в сети (что соответствует большинству случаев) соответствует терминам используемым в тех данных ИБП и стабилизаторов.

\*исключением является комбинация реакт. нагрузок L и C дающая колебательный контур(контур) который может породить нелинейность возбуждаясь на собственной частоте(частотах).

### Зарубежные термины

**Встречается разные определения линейной и нелинейной нагрузки:**

**1** Почти Правильное определение:

Linear Load=AC electrical loads where the voltage and current waveforms are sinusoidal. [11]

Правильное определение:

Linear Load=AC electrical loads where the current waveform is sinusoidal when load feeds from clear sinusoidal voltage source.

**Линейная нагрузка** - это нагрузка ток потребления которой синусоидален при условии питания от синусоидального источника напряжения. (Есть только основная гармоника тока (1) 50Гц.)

Это более распространённое и правильное определение. (Используется в тех данных стабилизаторов, ИБП.). Соответствует отечественному определению.

Пример – конденсаторы фазные, лампы накаливания, нагреватели и др.

**Нелинейная нагрузка** - это нагрузка ток потребления которой несинусоидален при условии питания от синусоидального источника напряжения. (То есть это нагрузка вырабатывающая гармонические токи высоких порядков (2,3,4... и тд.))

Пример – газоразрядные лампы с насыщающимися балластами, нагрузки имеющие на входе тиристорные или диодные выпрямители или преобразователи, PLC и др..

Современные газор. лампы с электронным балластом, SMPS, компьютеры и др. оборудование имеют внутренние блоки устранения гармонических искажений потребляемого тока (АККМ, THDфильтры), но всё равно вносят искажения в сеть и в больших количествах являются нелинейной нагрузкой.

**2** Пример неправильного определения

Linear Load =An AC electrical load in which both current and voltage waves reach their peak simultaneously. Also referred to as "in phase", linear loads are necessary to achieve maximum efficiency.[12]

Линейная нагрузка – это нагрузка в цепи питания которой ток и напряжение синфазны.

Это определение неправильно т.к. включает нагрузки порождающие гармоники.

### 3\_ Пример неправильного определения

Linear Load = AC electrical loads where the voltage and current waveforms are sinusoidal. The current at any time is proportional to voltage.

Линейная нагрузка - это нагрузка в цепи питания которой ток и напряжение синусоидальны и кроме того ток пропорционален напряжению в любой момент. [11]

Это определение неправильно т.к. :

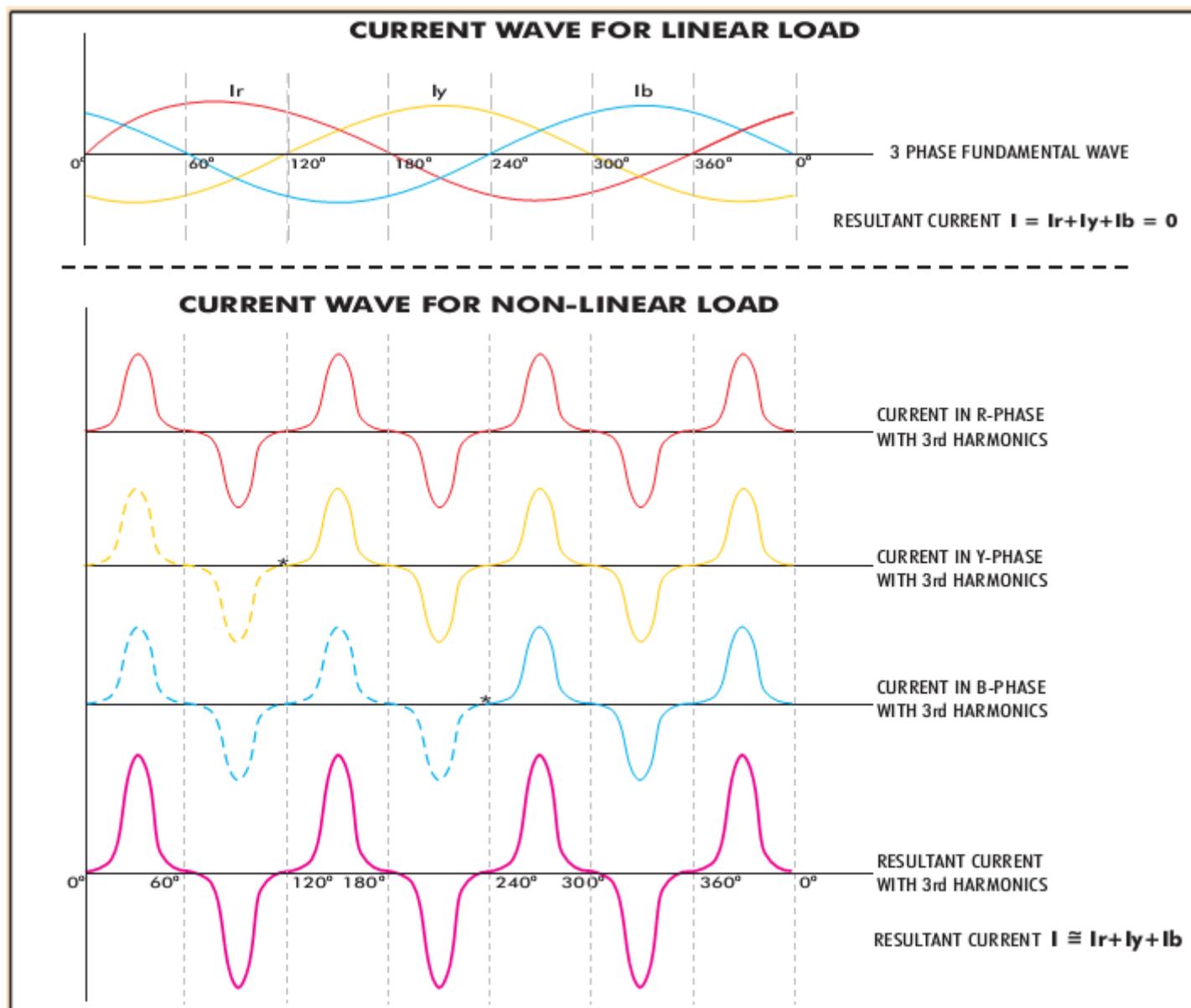
~~Даже если было бы указано что "СКЗ тока пропорционально СКЗ напряжения" всё равно определение будет неправильно т.к. на любую нелинейную нагрузку м.б. подано и несинусоидальное напряжение. (Вот так правильно - "Линейная нагрузка - это нагрузка в цепи питания которой ток синусоидален и кроме того ток (СКЗ) пропорционален напряжению (СКЗ) при условии питания от источника с синусоидальным напряжением")~~

На любую линейную нагрузку (например лампа накаливания) м.б. подано и несинусоидальное напряжение. Нагрузка всё равно остаётся линейной при этом.

Кроме того мгновенное значение сигнала тока и напряжения непропорциональны для линейной реактивной нагрузки (ток сдвинут от напряжения на угол  $\Phi$ ).

Дополнение:

Примеры токов для линейной и нелинейной нагрузки:



## **Высшие гармоники, субгармоники и интергармоники в электрических цепях [13],[14]:**

В идеальном случае электрические генераторы генерируют синусоидальный сигнал напряжения. Так же в идеальном случае активная нагрузка потребляет чисто синусоидальный ток синфазный с напряжением, или чисто реактивная нагрузка потребляет чисто синусоидальный ток несинфазный с сигналом напряжения. Главные мировые стандарты частоты 50Гц или 60Гц. Практически сигналы напряжений и токов в линиях переменного тока не синусоидальны, особенно когда присутствует нелинейная нагрузка(и), но искажены по причине присутствия высших гармоник то есть сигналов с частотами кратными основной частоте (например 100Гц 150Гц 200Гц и т.д.).

Гармоники это компоненты сигнала периодической формы, осциллирующие с частотой равной основной (главной) частоте умноженной на целое число. Так для электрической силовой системы с основной частотой 60Гц, вторая гармоника это 120Гц, третья - 180Гц, и так далее.

Компоненты с частотами находящимися между этими гармониками называются интергармоники. Так например для 60Гц системы, компонент с частотой 150Гц - это интергармоника которая существует между 2й и 3й гармониками.

Разложение Фурье позволяет разложить любой периодический сигнал (функцию) на сумму гармоник кратных основной. С этой точки зрения термин "интергармоники" является бессмысленным. Или, если существуют интергармоники, следовательно сигнал аperiodический или представляет собой сумму 2х (или более) периодических сигналов с разными фундаментальными частотами, таким образом следует признать существование 2х (или более) генераторов АС энергии в системе - примером может быть наверное мотор промстанка в режиме рекуперации.

**Субгармонические частоты** - это частоты ниже фундаментальной (главной) частоты колебаний, их частоты равны основной (главной) частоте умноженной на  $1/n$  где  $n$ -целое число.

Обычными представителями класса устройств (нагрузок) поражающих гармоники являются выпрямители и другие типы АС/DC, АС/АС преобразователей и др устройств собранных на полупроводниках. А так же сварочные аппараты и дуговое оборудование, печи индукционного нагрева, частотные приводы моторов, флуоресцентное освещение, и др. Такие устройства также могут вести к вариациям амплитуды и/или фазы фундаментальной и гармонических компонент, а так же приводить к росту интергармоник. Гармоники могут рассеивать электроэнергию превращая её в тепло. Гармоники на высоких частотах также ведут к большим потерям (поглощениям) мощности, которые могут привести к немедленному повреждению электрических компонентов.

Интергармоники могут вести к прерыванию/нарушению работы устройств с импульсным управлением (ripple control devices) которые используют сигнальные импульсы напряжений с интергармоническими частотами. Интергармоники могут также вызвать рост шума, особенно в аудиооборудовании, и к стрессам (перегрузочным режимам) моторов и генераторов.

## **ЭФФЕКТЫ ГАРМОНИК В НЕЙТРАЛИ**

В четырёхпроводной системе (3фазы+нейтраль), фундаментальные токи (т.е. токи основной частоты/гармоники 50Гц) всегда складываются в нейтрали и дают в сумме ноль. Но для гармоник более высоких порядков это не так. Например, третьи гармоники тока всегда синфазны во всех трёх фазных проводниках, поэтому при сложении в нейтрали они дадут утроенную амплитуду, что ведёт к серьёзным проблемам. Например: трёхфазная система питает нагрузку с током потребления 100А, и в токе каждой до 30% гармонического состава тока сконцентрировано в третьей гармонике. Гармонический ток (на третьей гармонике 150Гц) текущий через нейтраль утроится, то есть составит  $0,30 * 100А * 3 = 90$ Ампер. См. рисунок. выше и ниже.

Поэтому (для гармонических нагрузок //например датацентры и тп) рекомендуется использовать нейтраль с увеличенным в 1,5-2 раза сечением (по сравнению с номинальным сечением фазного проводника) для возможности питать нагрузки обоих видов – линейную и нелинейную.

Другие решения проблемы:

- Использовать 1 фазные ИБП /нагрузки с индивидуальной нейтралью.

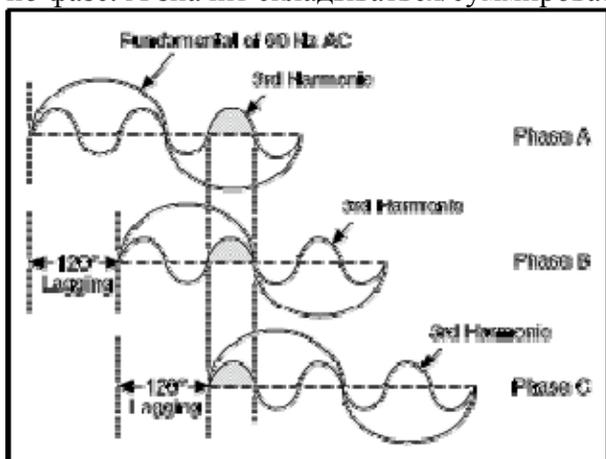
- Изза высоких частот гармоник, скин эффект вытесняет ток к поверхности что снижает рабочее сечение нейтрали, поэтому рекомендуется набирать нейтраль из нескольких проводников в параллели для увеличения площади поверхности, и следовательно рабочего сечения нейтрали.
- Использование 3ф трансформаторов (в т.ч. встроенных в ИБП, стаб.) блокирует гармоники кратные 3 на стороне обмотки "дельта или треугольник".

#### Дополнительное объяснение про 3ю гармонику [13],[14]:

Triplen harmonics are odd integer multiples of the 3rd harmonic: 3rd, 9th, 15th, 21st, and so on. In a three-phase electrical power system, where there is a 120 degrees phase difference, triplen harmonics are additive in the neutral conductor, as shown in the following figure.

В то время как основные гармоники отдельных фаз будут сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$ , третьи гармоники будут сдвинуты на  $3 \cdot 120^\circ = 360^\circ$  или  $0^\circ$ , пятые — на  $5 \cdot 120^\circ = 600^\circ$  или  $240^\circ$ , седьмые — на  $7 \cdot 120^\circ = 840^\circ$  или  $120^\circ$ , девятые — на  $9 \cdot 120^\circ = 3 \cdot 360^\circ$  или  $0^\circ$  и т. д.

Таким образом, гармоники, кратные трем ( $v = 3, 9, 15 \dots$ ), в отдельных фазах обмотки будут совпадать по фазе. А значит складываться/суммироваться/взаимоусиливаться в нейтрали. См рис. ниже:



Triplen harmonics can lead to large currents in the neutral conductor, resulting in significant overheating of wires and components, especially three-phase delta transformers.

Гармоники кратные трём могут вести к большим токам в проводнике нейтрали, что приводит к значительному перегреву проводов и компонентов, особенно трёхфазных дельта трансформаторов. Это связано с тем что гармоника кратная 3м будет циркулировать только внутри дельта(треугольной) обмотки трансформатора но попасть в другую обмотку трансформатора не может, то есть третья гармоника поглощается трансформатором. Таким образом дельта трансформатор является фильтром гармоник кратных 3м. Но он же вынужден их и рассеивать на себе.

То же самое из др. источника:

**По этой причине в линейных токах, которые представляют собой разность токов соответствующих фаз, гармоники, кратные трем, будут отсутствовать.** Поэтому токи этих гармоник будут циркулировать внутри замкнутого треугольника, причем, будучи равными по величине и совпадая по фазе, они образуют общий замкнутый циркуляционный ток.

Из изложенного следует, что в случае соединения одной из обмоток трансформатора в треугольник магнитные потоки, э. д. с. и напряжения фаз остаются синусоидальными. Это обстоятельство составляет существенное преимущество трехфазных трансформаторов, у которых одна из обмоток соединена в треугольник.

Таким образом ИБП или стабилизатор имеющий трансформатор  $\Delta/Y$  устраняет гармонику (тока потребления) кратную 3м. Но оборудование может пропускать энергию через трансформатор всегда или не во всех режимах -например кроме случая Байпасного режима -зависит от типа оборудования.

Сказанное в равной степени относится как к групповым трехфазным трансформаторам, так и к трехфазным трансформаторам с общим сердечником.

[11] A. P. Singhal V. P. Operations TRICOLITE // [PDF] [DEFERANCE BETWEEN LINEAR LOADS AND NON-LINEAR LOADS](#)

y - what is linear load

[12] <http://www.toolingu.com/definition-550210-76422-linear-load.html> What is the definition of "linear load"?

[13] Harmonics and Interharmonics (Electrical Power Suite) [http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373375B-01/lveptconcepts/ep\\_harm\\_interharm/](http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373375B-01/lveptconcepts/ep_harm_interharm/)

[14] Вольдек А.И. Электрические машины

<http://servomotors.ru/documentation/electromotor/book47/book47content.html>