

## 97-98 Общие сведения о нелинейных электрических цепях переменного тока

### 17.1. Общие сведения о нелинейных элементах и цепях

Нелинейные электрические цепи являются одной из разновидностей электрических цепей. Под нелинейными электрическими цепями понимают электрические цепи, содержащие хотя бы один нелинейный элемент. Нелинейный элемент – это элемент, вольт-амперная характеристика которого нелинейная. Зависимость тока, проходящего через нелинейный элемент, от напряжения на этом элементе принято называть *вольт-амперной характеристикой (ВАХ)*. У нелинейного элемента (это может быть резистор, катушка индуктивности, конденсатор) его параметры (соответственно сопротивление, индуктивность, емкость) изменяются в зависимости от величины приложенного напряжения или протекающего по нему тока. Соответственно это нелинейные вольт-амперные, вебер-амперные и кулон-вольтные характеристики.

Нелинейные элементы, в отличие от линейных, не могут быть описаны при помощи линейных уравнений (постоянных коэффициентов). Их характеризуют нелинейные уравнения, коэффициенты которых являются нелинейными функциями одной или нескольких переменных. Электрическое сопротивление линейного элемента является постоянной величиной, поэтому связь между током и напряжением на нем выражается линейным уравнением, и ВАХ линейного элемента есть прямая линия. Электрическое сопротивление нелинейного элемента зависит от значений или от направлений токов и напряжений на нем, и поэтому ВАХ нелинейного элемента выглядит в виде кривой.

Цепи, содержащие нелинейные элементы (нелинейные цепи), обладают рядом свойств, которые отсутствуют у линейных цепей. Эти свойства позволяют создать основанные на них автоматические системы управления и регулирования, устройства для преобразования электромагнитной энергии, передачи информации, вы-

числительные машины и др. На нелинейных эффектах основаны выпрямление, инвертирование и стабилизация напряжения, умножение и деление частоты, усиление мощности, получение модулированных колебаний различной формы, релейный эффект, запоминание сигналов и другие явления.

Электрические нелинейные цепи разделяют на цепи постоянного и переменного тока. При подключении цепи с любым нелинейным элементом к синусоидальному напряжению ток будет изменяться по периодическому, но несинусоидальному закону.

## Нелинейные цепи переменного тока

Нелинейные цепи переменного тока могут содержать как активные, так и реактивные нелинейные элементы: нелинейные резисторы, нелинейные катушки индуктивности и нелинейные конденсаторы. Катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником является нелинейной за счет нелинейной зависимости магнитного потока в сердечнике от протекающего по обмотке катушки тока. Катушку с ферромагнитным сердечником часто называют дросселем. У нелинейных конденсаторов между обкладками находится сегнетодиэлектрик (сегнетовая соль, титанат бария), который в отличие от обычных диэлектриков обладает способностью самопроизвольно (без внешнего электрического поля) поляризоваться. Он имеет сильную зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля, давления, температуры, а также большое значение диэлектрической проницаемости. Нелинейные конденсаторы называют еще варикондами. Изображение нелинейных элементов на схемах электрических цепей переменного тока приведено на рисунке 17.10.

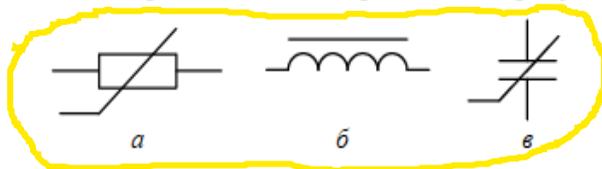


Рис. 17.10. Изображение нелинейных элементов на схемах электрических цепей переменного тока:

а – нелинейный резистор; б – нелинейная катушка индуктивности;  
в – нелинейный конденсатор

Существуют нелинейные резистивные элементы, у которых время установления режима соизмеримо с периодом переменного тока, т. е. проявляется инерционность. По этому показателю **нелинейные резистивные элементы** разделяют на инерционные и безынерционные.

К **инерционным** относятся те нелинейные элементы, **нелинейность** характеристик которых обусловлена температурным режимом (лампы накаливания, термисторы). Установление температурного режима в таких элементах требует некоторого времени. Температура и, следовательно, сопротивление такого элемента определяются действующим значением тока в нем. Таким образом, **для действующих значений** тока и напряжения инерционный элемент является нелинейным, а для мгновенных значений в интервале периода – **линейным**.

**Вольт-амперные характеристики безынерционных нелинейных элементов** остаются практически неизменными в широком диапазоне частот. Нелинейность таких элементов проявляется как для действующих, так и для мгновенных значений величин, **приводит к искажению форм кривых** тока, напряжения, магнитного потока, электрического заряда на их зажимах. Например, при синусоидальном напряжении на зажимах безынерционного нелинейного резистора ток в нем будет несинусоидальным и, наоборот, при синусоидальном токе напряжение на зажимах резистора будет несинусоидальным. **К безынерционным нелинейным элементам** относят полупроводниковые приборы: диоды, туннельные диоды, транзисторы, стабилитроны, тиристоры и др.

Различают статические и динамические характеристики **нелинейных элементов**. **Статическими** характеристиками нелинейных элементов называются соответствующие зависимости тока и напряжения – для резистора; **потокосцепления и тока** – для катушки; **электрического заряда и напряжения** – для конденсатора, **полученные при медленном изменении переменных**. **Динамическими характеристиками** нелинейных элементов называются те же зависимости  $u(i)$ ,  $\psi(i)$ ,  $q(u)$ , но **полученные при быстрых изменениях переменных**. При сравнительно невысоких частотах динамические характеристики практически совпадают со статическими. Сущест-

венные различия этих характеристик начинают проявляться в области высоких частот, например радиочастот.

Процессы в нелинейных цепях переменного тока описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, составляемыми на основе законов Кирхгофа. Общего метода решения таких уравнений не существует. Для анализа процессов в нелинейных цепях переменного тока можно использовать графический или графоаналитический метод расчета, который может быть произведен с некоторой степенью точности. В зависимости от того, какое нелинейное явление в цепи исследуется, какой характер цепи, характеристики нелинейных элементов, используется один из перечисленных выше методов расчета.

Все задачи по расчету нелинейных цепей переменного тока в установившемся режиме можно разделить на две группы. К первой группе относятся задачи, в которых целью расчета является определение действующих значений токов и напряжений. Такие задачи встречаются в электроэнергетике, где искажение форм кривых токов и напряжений незначительны и не играют существенную роль. Ко второй группе относятся задачи, в которых целью расчета является определение мгновенных значений токов и напряжений, а также форм кривых и гармонических спектров функций. Такие задачи встречаются в электронике, где принцип действия устройств основан на преобразовании форм кривых переменных с помощью нелинейных характеристик элементов.

В электрических цепях, содержащих нелинейные элементы, искажения форм кривых токов и напряжений незначительны, играют второстепенную роль и ими можно пренебречь. Для исследования таких цепей можно применять так называемый метод эквивалентных синусоид. Сущность метода состоит в том, что при незначительных искажениях форм кривых несинусоидальные функции токов и напряжений  $i(t)$  и  $u(t)$  заменяются эквивалентными по действующему значению синусоидальными функциями.

При малых искажениях форм кривых высшие гармоники практически не влияют на действующее значение функции, и действующее значение несинусоидальной функции практически равно действующему значению ее первой гармоники. Поэтому расчет нелинейных цепей переменного тока ведут по действующим значениям тока и напряжения для первых гармоник, пренебрегая высшими гармониками.