

50 Особенности параметров цепей синусоидального тока

9.1. Особенности параметров электрических цепей синусоидального тока

В состав электрических цепей переменного тока обычно входят резистивные элементы, катушки индуктивности, конденсаторы.

В резистивных элементах электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии. Эти элементы характеризуются значением сопротивления R . В электрических цепях постоянного тока его могут называть омическим.

В теории цепей синусоидального тока сопротивление R называют активным сопротивлением. С одной стороны, это вызвано тем, что необходимо привести название данного сопротивления в соответствие с названиями других по характеру сопротивлений (индуктивное, емкостное, реактивное, полное), характеризующих цепь синусоидального тока, с другой – тем, что один и тот же проводник оказывает большее сопротивление переменному току, чем постоянному. Причиной тому служит поверхностный эффект. Если по проводнику проходит переменный ток, то создается переменный магнитный поток в пространстве, окружающем проводник, и внутри самого проводника (рис. 9.1).

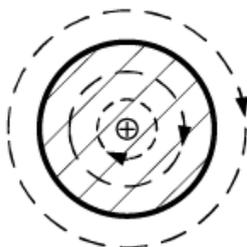


Рис. 9.1. Поперечное сечение проводника с током с изображением магнитных силовых линий

Повышение сопротивления проводников на высоких частотах (скин-эффект)

На высоких частотах наблюдается неравномерное распределение электрического тока по сечению проводников – плотность тока максимальна на поверхности и убывает по мере проникновения в глубь

проводника. Это явление получило название **поверхностного эффекта** или *скин-эффекта* (англ. *skin* – кожа). Причина скин-эффекта – воздействие на ток магнитного поля, создаваемого этим током, в виде возникающей при изменении магнитного потока противоЭДС самоиндукции, максимальной на оси проводника, и создающей там максимальное индуктивное сопротивление.

За **глубину проникновения переменного тока в проводник** принимают расстояние Δ , на котором плотность тока уменьшается в $e \approx 2,72$ раза по отношению к своему значению на поверхности. При этом фигуру, ограниченную экспонентой и координатными осями, условно заменяют прямоугольником той же площади. Плотность тока на глубине Δ составляет 38 % от плотности тока на поверхности, на глубине 2Δ – 13,5 %, а 3Δ – 5 %, однако, для упрощения расчётных формул считают, что до глубины Δ плотность тока такая же, как на поверхности, а глубже – тока нет.

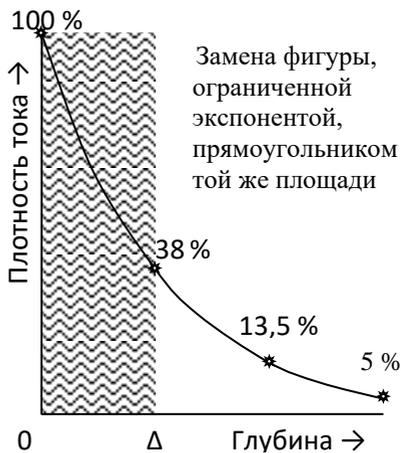


Рисунок 2.2 – Проникновение переменного тока в металл

С ростом частоты «вытеснение» тока к поверхности проводника проявляется сильнее, т. к. ЭДС самоиндукции возрастает пропорционально частоте. Степень проявления поверхностного эффекта зависит не только от частоты f , но и от магнитной проницаемости материала провода μ , а также от его удельной электропроводности γ .

Глубина Δ проникновения переменного тока в металл

$$\Delta = 1 / \sqrt{\pi f \mu_0 \mu \gamma},$$

где f – частота переменного тока, Гц;
 μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
 μ – относительная магнитная проницаемость;
 γ – удельная электропроводность, См/м.

Таблица – Глубина проникновения переменных токов в металлы

В миллиметрах

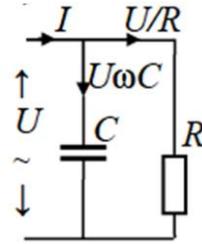
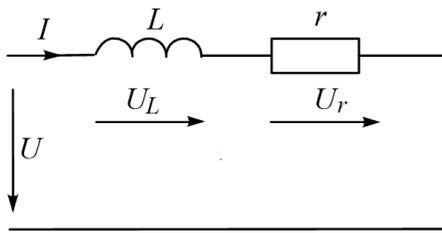
Частота тока, Гц	50	400	$3,4 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^5$	10^7
Медь	9,5	3,6	1,1	0,1	0,02
Алюминий	12	4,2	1.4	0,13	0,027
Железо (сталь)	2,8	1	0,3	0,03	0,006

Наиболее сильно поверхностный эффект наблюдается в железе (стали), т. к. это магнитный материал. При высоких частотах плотность тока во всех частях сечения, за исключением тонкого поверхностного слоя, практически равна нулю. В радиотехнике для плоских проводников используют специальную характеристику – сопротивление квадрата поверхности r_{\square} , определяемое в омах.

Любой резистивный элемент обладает некоторой индуктивностью и емкостью. Однако влиянием индуктивности и емкости в ряде случаев можно пренебречь, например при низкой частоте.

Реальный индуктивный элемент (индуктивная катушка) обладает, кроме индуктивности, и сопротивлением, которым, как правило, пренебречь нельзя. Тогда на схеме замещения индуктивная катушка изображается в виде двух последовательно соединенных элементов R и L .

В реальном емкостном элементе (конденсаторе) имеются некоторые потери энергии из-за несовершенства диэлектрика, применяемого в конденсаторе. В таком случае реальный емкостный элемент изображают на схеме замещения в виде параллельного соединения емкости C с проводимостью g . Потери энергии чаще всего относительно невелики, ими пренебрегают и изображают конденсатор в виде идеального емкостного элемента C .



Схемы замещения реальной катушки индуктивности
и реального конденсатора

Процессы в цепях переменного тока принципиально отличаются от процессов в цепях постоянного тока. В цепях переменного тока при изменениях напряжений и токов изменяются магнитные и электрические поля, связанные с цепью. При изменениях магнитных полей возникают ЭДС самоиндукции и взаимной индукции, а при изменениях электрических полей в цепи протекают зарядные и разрядные токи.

Законы, сформулированные в применении к цепям постоянного тока, очевидно, справедливы и для цепей переменного тока, но только для реально существующих в каждый момент времени мгновенных значений величин.

На основе выражений, полученных по этим законам для мгновенных значений, составляются уравнения и формулируются законы для векторов или изображений напряжений, ЭДС и токов в комплексном (символическом) виде.

В цепях переменного тока показываются, так же как и в цепях постоянного тока, условные положительные направления ЭДС, напряжений, токов. Хотя со временем эти направления могут меняться, но при составлении уравнений важна только взаимная ориентировка направлений токов, напряжений, ЭДС, поэтому в соответствии с принятыми положительными направлениями для мгновенных значений показываются и положительные направления для их амплитудных, действующих величин, а также их изображений.

Зависимости между токами и напряжениями резистивных, индуктивных, емкостных элементов определяются происходящими в них физическими процессами. Математическое описание физических явлений для каждого из этих элементов зависит от выбранного способа представления синусоидальных величин.