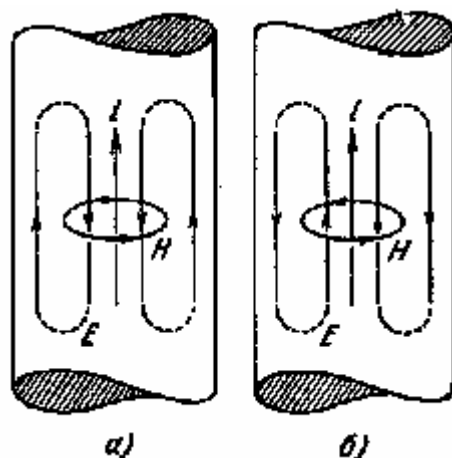


I.4 Скин-эффект

1 Качественный анализ

Рассмотрим теперь физику скин – эффекта. Если в однородном проводнике имеется постоянный ток, то плотность тока одинакова в разных точках сечения проводника. Иное наблюдается при переменном токе. В этом случае плотность тока оказывается не одинаковой по сечению: она наибольшая на поверхности и наименьшая на оси проводника. Эта неравномерность тем больше, чем толще проводник и чем больше частота переменного тока, и при очень больших частотах ток практически существует только в тонком поверхностном слое, отчего явление и получило название *скин-эффекта* (от англ- *skin*- кожа, поверхностный слой).

Указанное явление объясняется возникновением вихревого электрического поля электромагнитной индукции. Рассмотрим проводник с переменным током, и пусть в данный момент времени ток I имеет направление, указанное на рис. Э34 .



Объяснение Э34
вытеснения переменного тока
на поверхность проводника:
 H — магнитное поле тока,
 E — вызываемое им вихревое
электрическое поле:
а - ток нарастает,
б - ток убывает.

Этот ток создает внутри проводника магнитное поле H , силовые линии которого лежат в плоскости, перпендикулярной к оси проводника. Предположим, что ток I усиливается. Тогда возрастающее магнитное поле H вызовет появление вихревого электрического поля E (рис. Э34а), которое у поверхности проводника направлено одинаково с током I , а на оси

проводника - противоположно току. Это поле, следовательно, будет усиливать ток на поверхности, и ослаблять его на оси.

Допустим теперь, что ток I уменьшается. В этом случае ослабевающее магнитное поле H вызовет электрическое поле E , которое будет направлено противоположно по сравнению с первым случаем (рис. Э34б), т. е. будет у поверхности противоположно току, а на оси - совпадать с током. В обоих случаях, и при усилении, и при ослаблении тока, *вихревое электрическое поле будет на оси проводника препятствовать, а на поверхности способствовать изменениям тока*, а значит, на оси проводника переменный ток будет слабее, а на поверхности сильнее. Этот эффект присутствует, вообще - то, на любой частоте, но становятся особенно заметным на высоких частотах.



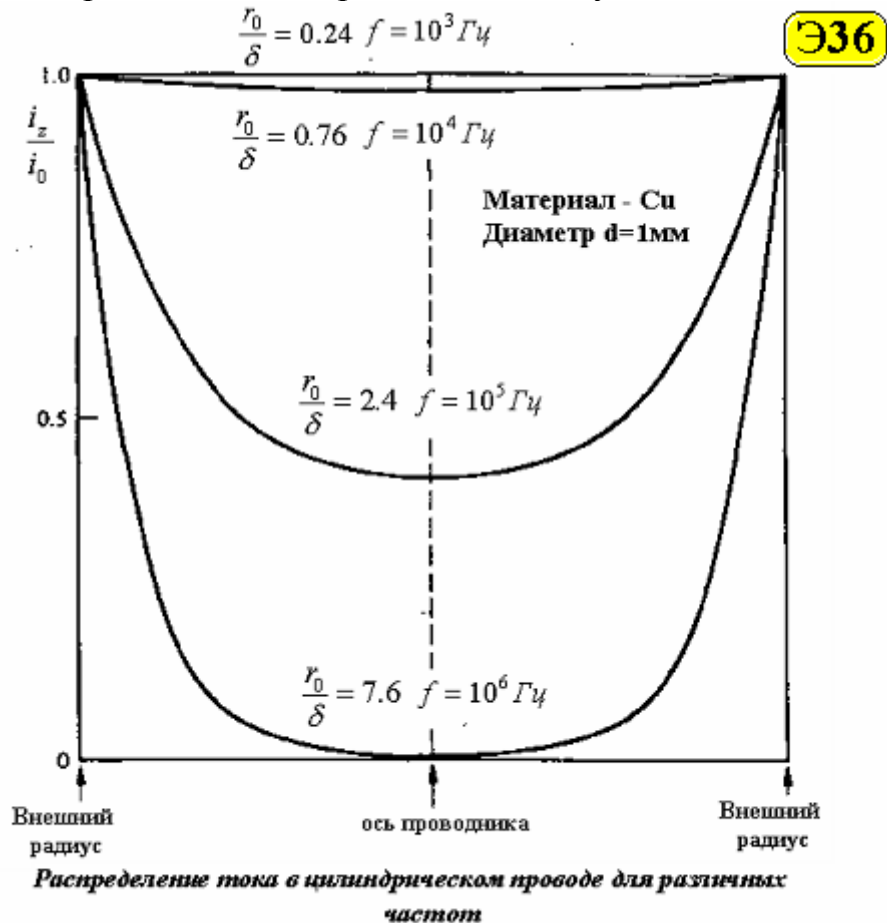
Распределения тока в проводниках различной конструкции из-за скин-эффекта

Вследствие скин-эффекта электрический ток при высоких частотах течет преимущественно сквозь поверхностный слой проводника. Это приводит к уменьшению действующего сечения проводника (рис. Э35) и, соответственно, к увеличению его сопротивления.

В этой связи вводится толщина скин-слоя δ . Она определяется как глубина, на которой плотность тока уменьшается в e раз или приблизительно на 36.9 процентов от величины тока на поверхности проводника.

Расчетное распределение тока в круглом цилиндрическом проводе - показано на рисунке Э36. Из рисунка видно, что большая часть тока на высоких частотах сосредоточена в тонком слое вблизи поверхности проводника. При постоянном токе или очень низких частотах ток равномерно распределен по всему сечению проводника и сопротивление постоянному току определяется соотношением $R_0 = \rho/(\pi r^2) \text{ } \Omega/\text{м}$ Это наименьшее сопротивление, которое проводник может иметь сразу после

изготовления. Вследствие температурных перепадов, вибрации или коррозии, его сопротивление со временем может увеличиваться.



Скин – эффект не ограничивается только вытеснением тока на поверхность проводника при протекании по проводнику высокочастотного тока. Проявлением скин-эффекта является также ослабление переменного магнитного поля по мере проникновения его вглубь проводника из-за того, что это возбуждающее поле создает во внутренних слоях вихревое электрическое поле. Вихревое электрическое поле, в свою очередь, создает во внутренних слоях вихревые токи. Магнитное поле этих вихревых токов внутри проводника будет направлено навстречу исходному возбуждающему магнитному полю и будет ослаблять его. Таким образом, благодаря поверхностному эффекту плотность вихревых токов и напряженность магнитного поля по мере углубления в проводник будет падать.

Действительно, при постоянном токе магнитное поле возникает как во внешнем пространстве, так и внутри проводника. При наличии скин-эффекта ток существует практически только в поверхностном слое, и магнитного поля внутри проводника нет. А это значит, что магнитная

энергия становится меньше на величину энергии поля внутри проводника. Следовательно, индуктивность проводника с ростом частоты уменьшается.

2. Основы теории поверхностного эффекта

Рассмотрим основы теории скин эффекта. Будем предполагать, что поля и токи меняются по гармоническому закону от времени, т.е. пропорциональны $\exp(-i\omega t)$. Будем также считать, что электромагнитная волна распространяется вдоль оси z , и строго поперечна, т. е. $H_y = H$ и $E_x = E$. Все остальные компоненты магнитного $H_x = H_z = 0$ и электрического $E_y = E_z = 0$ полей равны нулю. Тогда из уравнения для $\text{rot}H$ получим

$$\nabla \times H = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & H_y & 0 \end{vmatrix} = -\frac{\partial H_y}{\partial z} = (\sigma + i\omega\epsilon\epsilon_0)E_x \quad (\text{Э-76})$$

И из уравнения для $\text{rot}E$ получим

$$\nabla \times E = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & 0 & 0 \end{vmatrix} = \frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega\mu\mu_0 H_y \quad (\text{Э-77})$$

Дифференцируя (Э-77) по z получим

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = -i\omega\mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (\text{Э-78})$$

Подставляя полученное выражение в (Э-76), получим

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = i\omega\mu\mu_0(\sigma + i\omega\epsilon\epsilon_0)E_x$$

В хорошо проводящих металлах вплоть до частот в сотни МГц соблюдается неравенство $\left| \frac{\sigma}{\omega\epsilon\epsilon_0} \right| \gg 1$, тогда

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + i\omega\mu\mu_0\sigma E_x = 0$$

Это уравнение можно записать как

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \frac{i}{\delta^2} E_x = 0 \quad (\text{Э-79})$$

где

$$\delta = \sqrt{1/\omega\mu\mu_0\sigma} \quad (\text{Э-80})$$

называется глубиной проникновения.

Напряженность электрического поля вглубь проводника будет спадать пропорционально $e^{-z/\delta}$. На расстоянии δ от границы амплитуда поля спадает в e раз. На расстоянии нескольких δ поле уже пренебрежимо мало, например, на глубине 10δ оно ослабляется в $e^{10} \approx 22026$ раз.

Более точное решение последнего уравнения для напряженности электрического поля дает следующее выражение для глубины проникновения поля в металл

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu\mu_0\sigma} = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\mu_0\sigma f}} \quad (\text{Э-81})$$

В случае меди это дает

$$\delta[\text{мм}] = 66 / \sqrt{f[\text{Гц}]}$$

Например, при $f = 10^4 \text{ МГц} = 10 \text{ ГГц}$ $\delta = 0,66 * 10^{-3} \text{ мм}$.

Аналогичные уравнения можно записать для магнитного поля. Таким образом, высокочастотные электромагнитные поля в проводнике сосредоточены вблизи поверхности проводника.

Отметим, что в силу закона Ома $j = \sigma E$ плотность тока j убывает вглубь проводника по тому же закону, т.е. ток сосредоточен вблизи границы проводника, и его можно рассматривать как поверхностный.

Для поверхностного сопротивления можно записать

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi\mu\mu_0 f}{\sigma}} \quad (\text{Э-82})$$