

Симметричные кабели

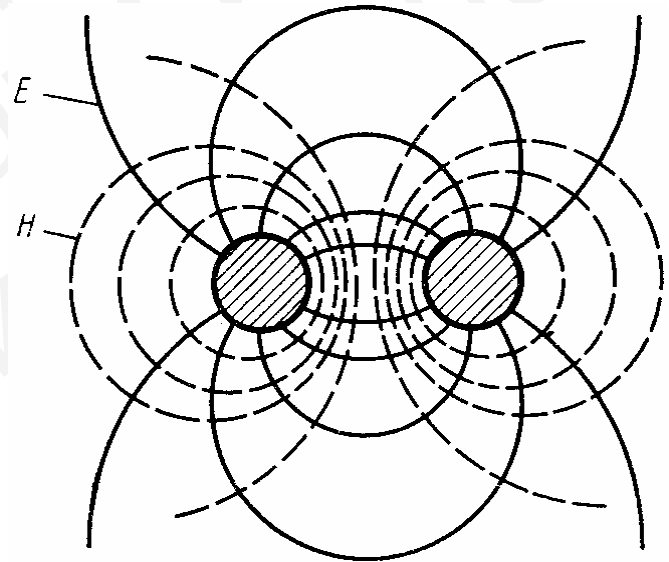
Электрические процессы в симметричных цепях

Отличительной особенностью симметричных линий является наличие двух проводов, имеющих одинаковые конструктивные и электрические свойства.

В симметричной цепи электромагнитное поле открытое и действует на значительном расстоянии от проводников.

Под действием переменного поля происходит перераспределение электромагнитной энергии по сечению проводников, при этом начинают сказываться:

- *поверхностный эффект*;
- *эффект близости* соседних проводников;
- воздействие на параметры цепи окружающих металлических масс (соседних проводников, экрана, брони).



В симметричных кабельных цепях действуют все три фактора одновременно. В воздушных линиях, где провода расположены сравнительно далеко друг от друга и отсутствуют наружные металлические оболочки, следует учитывать лишь поверхностный эффект. В коаксиальных кабелях, являющихся закрытой системой, не учитывается действие окружающих металлических масс.

За счет указанных явлений происходит перераспределение электромагнитного поля и изменяются параметры цепей. Активное сопротивление R и емкость C возрастают, индуктивность L уменьшается. Наиболее существенно возрастет сопротивление цепи:

$$R = R_0 + R_{\text{п.э.}} + R_{\text{э.б.}} + R_{\text{м}},$$

где R_0 – сопротивление постоянному току;

$R_{\text{п.э.}}$ – сопротивление за счет поверхностного эффекта;

$R_{\text{э.б.}}$ – сопротивление за счет эффекта близости;

$R_{\text{м}}$ – сопротивление, обусловленное потерями в окружающих металлических массах.

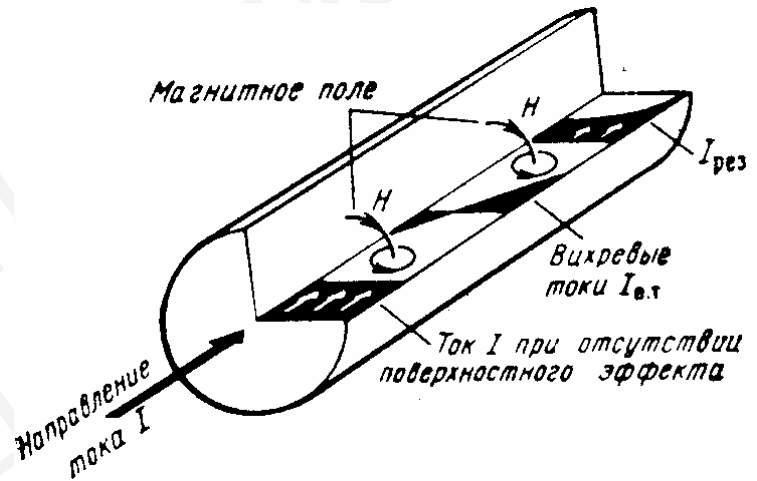
Поверхностный эффект

Представляет собой перераспределение тока по сечению проводника, при котором плотность его возрастает к поверхности проводника.

Протекающий через проводник ток I создает вокруг него магнитное поле. Силовые линии внутреннего поля, пересекая толщину проводника, наводят в нем вихревые токи $I_{в.т.}$, направленные по закону Ленца против вращения рукоятки буравчика.

Вихревые токи в центре проводника имеют направление, обратное движению основного тока, протекающего по проводнику, а на периферии их направления совпадают.

Поверхностный эффект увеличивается с возрастанием частоты тока, магнитной проницаемости, проводимости и диаметра проводника. При достаточно высокой частоте ток протекает лишь по поверхности проводника, что вызывает увеличение его активного сопротивления.

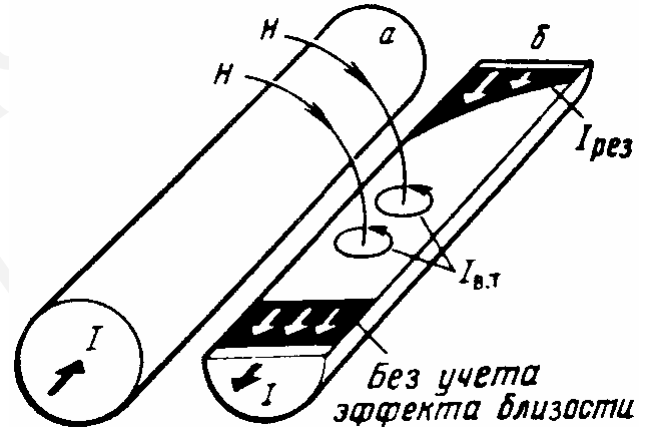


По другому поверхностный эффект можно объяснить как проникание электромагнитного поля в толщу проводника, причем чем выше частота, тем меньше глубина проникновения поля в металл.

Эффект близости

Внешнее поле H проводника a , пересекая толщу проводника b , наводит в нем вихревые токи. На поверхности проводника b , обращенной к проводнику a , они совпадают по направлению с протекающим по нему основным током ($I + I_{в.т.}$), на противоположной поверхности про-

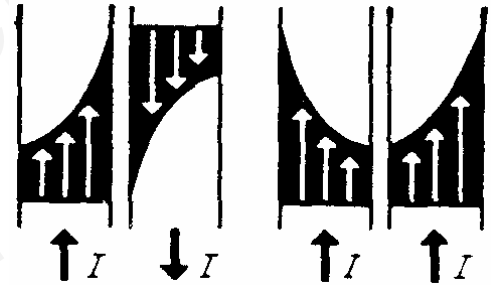
водника b они направлены навстречу основному току ($I - I_{в.т.}$). Аналогичное перераспределение токов происходит в проводнике a .



При взаимодействии вихревых токов с основным плотность результирующего тока на обращенных друг к другу поверхностях проводников a и b увеличивается, а на отдаленных – уменьшается.

Это явление («сближение» токов в проводниках a и b) носит название *эффекта близости*.

Из-за неравномерного распределения плотности тока увеличивается активное сопротивление цепи переменному току.

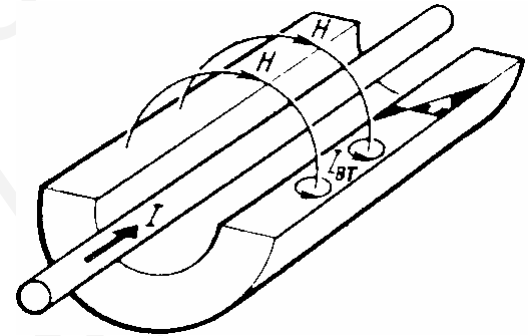


Если по двум соседним проводникам токи проходят в одном направлении, то перераспределение их плотности из-за взаимодействия внешних электромагнитных полей приводит к увеличению плотности токов на взаимно отдаленных поверхностях проводников a и b .

Эффект близости также прямо пропорционален частоте, магнитной проницаемости, проводимости и диаметру проводника и, кроме того, зависит от расстояния между проводниками. С уменьшением этого расстояния действие эффекта близости возрастает в квадрате.

Влияние окружающих металлических масс

Магнитное поле H , создаваемое током, протекающим по проводам цепи, наводит вихревые токи $I_{в.т.}$ в соседних проводниках кабеля, окружающем экране, металлической оболочке и броне.



Проходя по металлическим частям кабеля, они нагревают их и создают дополнительные тепловые потери энергии. Другими словами, происходит как бы «отсасывание» некоторой доли передаваемой энергии, причем наиболее воздействуют близко расположенные к рассматриваемой цепи металлические части кабеля.

Кроме того, вихревые токи создают поле обратного действия, которое воздействует на проводники цепи и изменяют их параметры.

Определение первичных параметров кабельных линий

Сопротивление и индуктивность

Определение сопротивления и индуктивности производится на основе учета энергии, поглощаемой проводником из окружающего пространства.

Выражения для определения этих параметров имеют вид:

$$R = R_a + R_b = 2R_0\chi \left[1 + F(kr) + \frac{p_c G(kr)(d/a)^2}{1 - H(kr)(d/a)^2} \right], \text{ [Ом/км]},$$

где R_a , R_b – сопротивления проводников a и b ;

d – диаметр проводников; a – расстояние между проводниками;

r – радиус проводников; $k = \sqrt{\omega\mu_a\sigma}$ – коэффициент потерь для металла;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость проводников;

p_c – параметр, определяемый типом скрутки; (для парной скрутки $p_c = 1$);

χ – коэффициент скрутки; $\chi = 1,02 \dots 1,07$ (зависит от диаметра кабеля);

$F(kr)$, $G(kr)$, $H(kr)$ – цилиндрические функции.

Приведенное выше выражение для расчета сопротивления состоит из:

– сопротивления постоянному току: $R_0 = 2R_0$;

– сопротивления за счет поверхностного эффекта: $R_{п.э.} = 2R_0 F(kr)$;

– сопротивления за счет эффекта близости: $R_{э.б.} = 2R_0 \frac{\rho_c G(kr)(d/a)^2}{1 - H(kr)(d/a)^2}$.

Индуктивность цепи в целом определяется суммой внешней $L_{вн}$ и внутренней $L_{в}$ (по отношению к проводнику) индуктивности:

$$L = L_{вн} + 2L_{в} = \left[4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu Q(kr) \right] \cdot 10^{-4}, \text{ [Гн/км]},$$

где μ – относительная магнитная проницаемость проводников;

$Q(kr)$ – цилиндрическая функция.

Емкость и проводимость изоляции

Емкость C и проводимость G связаны с процессами в диэлектрике. Емкость определяет его способность к поляризации и величину токов смещения, а проводимость – величину потерь.

С учетом близости соседних пар проводников и влияния наружной металлической оболочки емкость определяется по формуле:

$$C = \frac{\chi \varepsilon \cdot 10^{-6}}{36 \ln(\psi a / r)}, [\text{Ф/км}],$$

где ε – диэлектрическая проницаемость изоляции;

ψ – поправочный коэффициент, характеризующий близость металлической оболочки и соседних проводников; $\psi = 0,6 \dots 0,7$.

Потери в диэлектрике характеризуются углом диэлектрических потерь δ

$$G = G_0 + G_j = \frac{1}{R_{\text{из}}} + \omega C \operatorname{tg} \delta, [\text{См/км}],$$

где G_0 – проводимость, обусловленная утечкой тока в диэлектрике;

G_j – проводимость, обусловленная диэлектрическими потерями;

$R_{\text{из}}$ – сопротивление изоляции кабеля.

Кабели связи имеют, как правило, сложную комбинированную изоляцию, состоящую из твердого диэлектрика и воздуха. Результирующие эквивалентные значения диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь сложной изоляции определяются свойствами и соотношением объемов составных ее частей. Эквивалентные значения сложной изоляции близки к соответствующим величинам той части, которая занимает больший объем.

Определение первичных параметров воздушных линий

Отличие воздушных линий от кабельных состоит в том, что у воздушных больше расстояние между проводниками ($a/r \approx 50$) и нет заметного искажения поля за счет взаимодействия проводов и не проявляется эффект близости.

Поэтому выражения для первичных параметров линии принимают вид:

$$R = 2R_0 [1 + F(kr)], \text{ [Ом/км];} \quad L = [4 \ln(a/r) + \mu Q(kr)] \cdot 10^{-4}, \text{ [Гн/км];}$$

$$C = 10^{-6} / 36 \ln(a/r), \text{ [Ф/км];} \quad G = G_0 + nf, \text{ [См/км],}$$

где n – коэффициент, учитывающий потери в воздухе при переменном токе;

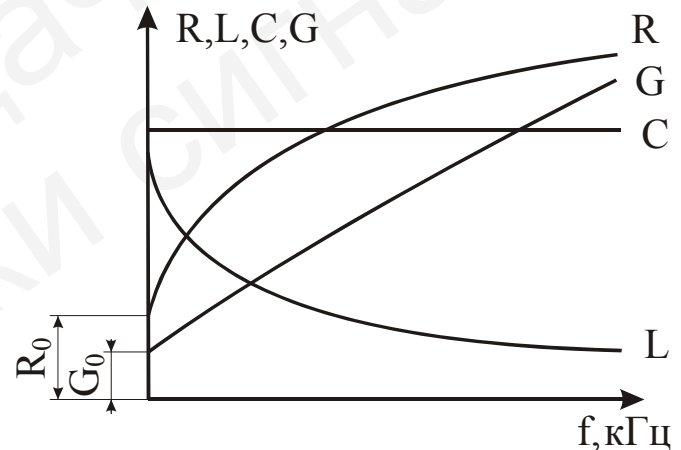
для сухой погоды: $G_0 = 0,01 \cdot 10^{-6}$ См/км; $n = 0,05 \cdot 10^{-9}$;

для сырой погоды: $G_0 = 0,05 \cdot 10^{-6}$ См/км; $n = 0,25 \cdot 10^{-9}$.

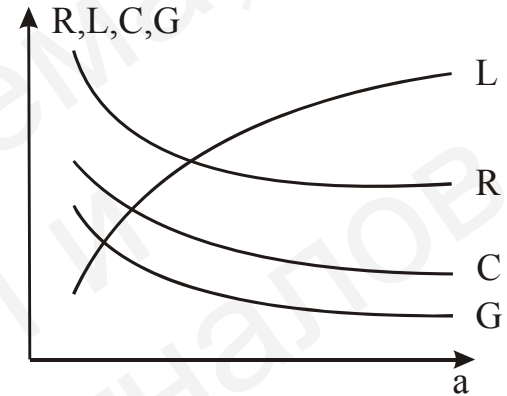
Гололед и изморозь также существенно увеличивают проводимость изоляции воздушной линии, особенно в области высоких частот.

Основные зависимости первичных параметров симметричных линий

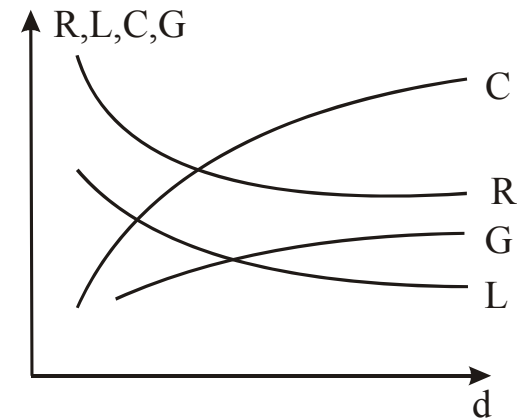
Параметры R и G с увеличением частоты f возрастают за счет потерь в проводниках на вихревые токи и в изоляции на диэлектрическую поляризацию. Индуктивность L с увеличением частоты уменьшается, так как внутренняя индуктивность проводников уменьшается за счет поверхностного эффекта. Емкость C не зависит от частоты.



При увеличении расстояния между проводниками a параметры R , C и G закономерно уменьшаются, а индуктивность L растет. Снижение R обусловлено уменьшением потерь на эффект близости. Рост L связан с увеличением контура, пронизываемого магнитным потоком. Емкость C уменьшается, поскольку проводники удаляются друг от друга и уменьшается их взаимодействие.



С увеличением диаметра проводников d параметры C и G растут, а L уменьшается. Изменение активного сопротивления R имеет сложный характер. Это обусловлено тем, что с увеличением диаметра проводника сопротивление постоянному току резко уменьшается, а сопротивление за счет поверхностного эффекта и эффекта близости растет. Поэтому вначале R резко снижается, а затем это снижение замедляется.



Значения первичных параметров существующих типов линий составляют: $R = 5 \dots 200$ Ом/км; $L = 0,6 \dots 2$ мГ/км; $C = 6 \dots 50$ нФ/км; $G = 1 \dots 200$ мкСм/км.

В кабельных линиях за счет тонких проводников и близкого их расположения преобладают параметры R и C . Емкость кабеля в 3...5 раз больше емкости воздушной линии, а активное сопротивление – в 5...10 раз. Индуктивность кабеля, наоборот, меньше в 2...3 раза.

Определение вторичных параметров симметричных линий

Вторичные параметры симметричных линий (Z_B , α , β , v) рассчитываются по общим формулам. В ряде случаев их можно выразить непосредственно через габаритные размеры цепей (a , d) и качество исходных материалов (ϵ , $\text{tg}\delta$).

Волновое сопротивление симметричной линии:

$$Z_B = \frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln \left(\frac{a-r}{r} \right), [\text{Ом}].$$