



На высоких частотах ток, протекающий через проводник, распределяется по его сечению неравномерно. Под действием сильных магнитных полей переменного тока происходит «выталкивание» тока от центра проводника к его поверхности (**скин-эффект**). В результате ток протекает по меньшей площади поперечного сечения, что выглядит как уменьшение диаметра провода. Чем выше частота, тем меньше толщина поверхностного слоя (**скин-слоя**), по которому течет ток, и тем больше сопротивление проводника протекающему току. Глубина скин-слоя определяется как расстояние ниже поверхности, где плотность тока падает на $1/e$ от значения на поверхности (e – основание натурального логарифма).

Для минимизации потерь, возникающих из-за **скин-эффекта**, применяются проводники особой конструкции, которые состоят из большого числа тонких жил, изолированных одна от другой. Жилы переплетены между собой так, что каждая проходит по поверхности и в любом месте поперечного сечения на всём протяжении провода; это усредняет импеданс каждой жилы, в результате чего в них протекают равные токи. В таком проводнике, называемым **литцендратом** (нем. *Litzen* — пряди и *Draht* — провод), ток течет по поверхности каждой жилы, в результате рабочая площадь поперечного сечения проводника значительно увеличивается, а сопротивление токам высокой частоты уменьшается.

Как правило, при проектировании устройств, требующих применения литцендрата, значения рабочей частоты и тока в проводнике известны заранее. Поскольку главное преимущество литцендрата заключается в уменьшении сопротивления переменному току по сравнению с одножильным проводом эквивалентного сечения, основным параметром, который учитывается при выборе конструкции и сечения провода, является рабочая частота. В таблице 1 показана зависимость соотношения между сопротивлениями переменному току и постоянному току (коэффициент Н) от коэффициента Х для одиночного изолированного проводника круглого сечения:

Таблица 1.

X	0	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
H	1.0000	1.0003	1.0007	1.0012	1.0021	1.0034	1.005

Коэффициент Х рассчитывается по формуле:

$$X = 10.67 * d * \sqrt{f}, \quad (1)$$

где: d – диаметр провода, мм,
f – частота, МГц.

Из Таблицы 1 и другой эмпирической информации была получена Таблица 2, в которой приведены рекомендуемые диаметры единичной жилы изолированной жилы многожильного провода в зависимости от рабочей частоты.

Таблица 2.

Частота	Рекомендуемое сечение жилы, AWG	Диаметр жилы без изоляции, мм	Активное сопротивление жилы, Ом/м	Коэффициент Н
60 Гц...1 кГц	28	0,32	0,21775	1,0000
1...10 кГц	30	0,254	0,34718	1,0000
10...20 кГц	33	0,18	0,69455	1,0000
20...50 кГц	36	0,127	1,417	1,0000
50...100 кГц	38	0,102	2,2372	1,0000
100...200 кГц	40	0,079	3,7805	1,0000
200...350 кГц	42	0,064	5,9088	1,0000
350...850 кГц	44	0,051	9,42585	1,0003
850...1,4 МГц	46	0,04	14,9081	1,0003
1,4...2,8 МГц	48	0,031	23,901	1,0003

После выбора диаметра жилы соотношение между сопротивлениями переменному и постоянному току идеального литцендрата, т.е. такого, в котором каждая жила последовательно «пронизывает» каждую точку площади поперечного сечения, может быть определено по следующей формуле:

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = H + K \left(\frac{Nd_1}{d_0} \right)^2 G, \quad (2)$$

где: Н – коэффициент из Таблиц 1 и 2,
G - коэффициент поправки на вихревые токи, определяемый по формуле:

$$G = \left(\frac{d_1 \sqrt{f}}{265.176} \right)^4, \quad (3)$$

N – количество жил в кабеле,

d_1 – диаметр жилы, мм,

d_0 – диаметр жгута, мм,

f – частота, Гц,

K – постоянная, зависящая от количества жил в кабеле, определяется по следующей таблице:

Таблица 3.

N	3	9	27	∞
K	1,55	1,84	1,92	2

Сопротивление многожильного кабеля постоянному току зависит от следующих факторов:

1. сечения жилы,
2. количества жил,
3. коэффициента удлинения одиночной жилы по сравнению с единицей длины жгута, возникающего как результат плетения жил. Типичными считаются значения 1,5% для каждого порядка операции плетения жил в жгут и 2,5% для

каждого порядка операции скручивания жгутов в кабель.

Следующая формула позволяет определить сопротивление постоянному току литцендрата любой конструкции:

$$R_{DC} = \frac{R_S (1.015)^{N_B} (1.025)^{N_C}}{N_S}, \quad (4)$$

где: R_S – сопротивление единичной жилы, Ом (см. таблицу 2),
 N_B – количество порядков операции плетения в жгут,
 N_C – количество порядков операции скручивания жгутов в кабель,
 N_S – общее количество жил в кабеле.

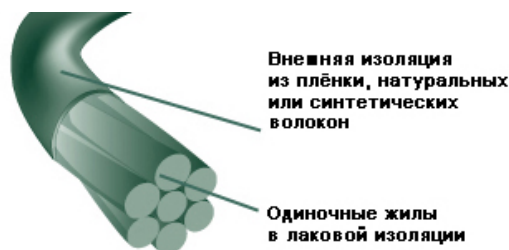


Рис.1. Литцендрат 1-го типа



Рис.2. Литцендрат 2-го типа

Пример 1. Рассчитаем сопротивления провода типа 2 (см. Рис.2), состоящего из 450 жил диаметром 0,079 мм на частоте 100 кГц. Данный провод производится путём свивания пяти жгутов (скручивание жгутов в кабель **первого** порядка), каждый из которых, в свою очередь, получен свиванием трёх жгутов (плетение **второго** порядка), сформированных из 30 жил диаметром 0,079 мм (плетение **первого** порядка).

1. Определим активное сопротивление провода по формуле (4):

$$R_{DC} = \frac{3780.5 * (1.015)^2 (1.025)^1}{450} = 8.87 \text{ Ом/км},$$

2. Вычисляем отношение $\frac{R_{AC}}{R_{DC}}$ при помощи формулы (2):

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = 1.0000 + 2 * \left(\frac{450 * 0.079}{2.388} \right)^2 * (7.877 * 10^{-5}) = 1.035,$$

Преимущество литцендрата становится очевидным при сравнении с круглым проводом диаметром 1,67 мм, имеющим эквивалентную площадь сечения. Активное сопротивление одножильного провода составит порядка 7,853 Ом/км, однако на частоте 100 кГц соотношение между сопротивлениями переменному и постоянному току возрастает примерно до 21,4; таким образом, сопротивление переменному току составит 168 Ом/км.

Пример 2. Рассчитаем сопротивления провода типа 2 (см. Рис.2), состоящего из 1260 жил диаметром 0,100 мм на частоте 66 кГц. Этот провод образован из семи жгутов (скручивание жгутов в кабель **первого** порядка), каждый из которых, в свою очередь, получен свиванием шести жгутов (плетение **второго** порядка), сформированных из 30 жил диаметром 0,100 мм (плетение **первого** порядка).

1. Определим активное сопротивление провода по формуле (4):

$$R_{DC} = \frac{2176.5 * (1.015)^2 (1.025)^4}{1260} = 1.824 \text{ Ом / км},$$

2. Вычисляем отношение $\frac{R_{AC}}{R_{DC}}$ при помощи формулы (2):

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = 1.0000 + 2 * \left(\frac{1260 * 0.1}{4.75} \right)^2 * (8.81 * 10^{-5}) = 1.124,$$

Одножильный провод диаметром 3,55 мм имеет такую же площадь поперечного сечения, но очевидно, что при глубине скин-слоя, равного 0,257 мм, такой провод можно рассматривать как тонкостенный цилиндр с толщиной стенки, равной глубине скин-слоя.

*По материалам фирмы **New England Wire***