

## Предварительные расчеты кабельных линий

### Расчет вторичных параметров силового кабеля

Волновые параметры кабеля, по конструкции схожего с коаксиальным кабелем, вычисляются по формулам:

Волновое сопротивление (без учета потерь в жиле и экране), Ом

$$Z_c = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{j * 2 * \pi * f * \mu_v * \mu_r}{\frac{1}{\rho} + j * 2 * \pi * f * \epsilon_v * \epsilon_r}} * \ln\left(\frac{D_s}{D_w}\right) \quad (1.1)$$

Емкость, Ф/м

$$C_c = \frac{2 * \pi * \epsilon_v * \epsilon_r}{\ln\left(\frac{D_s}{D_w}\right)} \quad (1.2)$$

Внешняя межпроводниковая индуктивность коаксиального кабеля, Гн/м

$$L_c = \frac{\mu_v * \mu_r}{2 * \pi} * \ln\left(\frac{D_s}{D_w}\right) \quad (1.3)$$

И проводимость, Сим/м

$$G_c = \frac{2 * \pi}{\rho * \ln\left(\frac{D_s}{D_w}\right)} \quad (1.4)$$

, где  $\rho$  – удельное сопротивление материала жилы,  $10^{-8}$  Ом\*м,

$D_s$  – диаметр кабеля по изоляции (внутреннему экрану), м

$D_w$  – диаметр жилы, м

На высоких частотах, используя типичные для немагнитных проводников значения постоянных

$$\begin{aligned} \epsilon_v &= 8.854 * 10^{-12}, \text{Ф} / \text{м} \\ \epsilon_r &= 1 \\ \mu_v &= 1.257 * 10^{-6} * \mu_r, \text{Гн} / \text{м} \\ \mu_r &= 1 \end{aligned} \quad (1.5)$$

, и обозначение для коэффициента формы Sf

$$Sf = \frac{\ln\left(\frac{D_s}{D_w * k_f}\right)}{2 * \pi} \quad (1.6)$$

, где  $k_f$  – коэффициент формы, описывающий влияние полуизолирующего слоя на свойства кабеля

$$k_f = \frac{D_s}{D_w} * \exp\left(-0.01668 * Z_c * \sqrt{\epsilon}\right) \quad (1.7)$$

$k_{scr.w}$  - коэффициент скрутки, зависящий от числа проводников в жиле и шага повива, для силовых кабелей 1,0 - 8,0 (на низкой частоте 1,1). Первое приближение

$$k_{scr.w} = \frac{\pi * Dw^2}{4 * Sw} \quad (1.8)$$

, где  $Sw$  - номинальное сечение жилы кабеля,  $m^2$ ,  
получим выражения:

Волновое сопротивление кабеля, Ом

$$Z_c = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{j * 2 * \pi * f * \mu_v * \mu_r}{1 + j * 2 * \pi * f * \epsilon_v * \epsilon_r}} * \ln\left(\frac{Ds}{Dw}\right) = \sqrt{\frac{\mu_v * \mu_r}{\epsilon_v * \epsilon_r}} * Sf \quad (1.9)$$

$$Z_c = 376.79 * \frac{Sf}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1.10)$$

или

$$Z_c = \frac{59,9678}{\sqrt{\epsilon}} * \ln\left(\frac{Ds}{Dw * k_f}\right)$$

, где  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость изолирующего слоя,  
 $Ds$  - диаметр кабеля по изоляции (внутреннему экрану), мм  
 $Dw$  - диаметр жилы, мм

Погонная емкость кабеля [нФ/км], которая так же зависит от его конструкции, находится из приведенных ниже выражений (кому как нравится)

$$Cc = \frac{8.854 * \epsilon'}{Sf} \quad (1.11)$$

$$Cc = 3336.0987 * \frac{\sqrt{\epsilon'}}{Z_c}$$

Для кабеля простой конструкции эквивалентная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon'$  равна  $\epsilon$ .

Для кабеля, у которого жила покрыта полуизолирующим слоем с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{pi}$  (2.474), эквивалентная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon'$  составит

$$\epsilon' = \frac{\epsilon * \epsilon_{pi} * \ln\left(\frac{Ds}{Dw}\right)}{\epsilon_{pi} * \ln\left(\frac{Dw + Dwi}{Dw}\right) + \epsilon * \ln\left(\frac{Ds}{Dw + Dwi}\right)} \quad (1.12)$$

или

$$\epsilon' = \frac{Cc * Sf}{\epsilon_v} \quad (1.13)$$

, где  $Dwi$  - толщина полуизолирующего слоя, покрывающего токопроводящую жилу.

Обычно данные по  $Dwi$  не приводятся, но можно либо принять  $Dwi=0.5 \dots 2.0$  мм (0.75), и уточнить его при поверочных расчетах (при расчете толщины изоляции, изолирующие свойства полупроводящего покрытия не учитываются), либо вычислить его из выражения

$$Dwi = 0.5 * (Ds - Dw - 2 * Di) \quad (1.14)$$

При известной емкости кабеля диэлектрическую проницаемость полуизолирующего слоя можно вычислить по формуле

$$\varepsilon_{pi} = \frac{\ln\left(\frac{Ds}{Dw + Dwi}\right)}{\frac{\varepsilon_v}{Cc * Sf} * \ln\left(\frac{Ds}{Dw}\right) - \frac{1}{\varepsilon} * \ln\left(1 + \frac{Dwi}{Dw}\right)} \quad (1.15)$$

Погонная индуктивность [мГ/км] кабеля равна

$$Lc = 1.2564 * \frac{\ln\left(\frac{Ds}{Dw}\right)}{2 * \pi} \quad (1.16)$$

$$Lc = 0.000001 * Cc * Zc^2$$

$Ds$  не всегда известен, но может быть вычислен по приводимой величине толщины изоляции  $Di$ , мм

$$Ds = Dw + 2 * Di + 2 * Dwi \quad (1.17)$$

Задержка (постоянная времени) распространения [нс/м]

$$t = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{0,2998} \quad (1.18)$$

$$t = \sqrt{Lc * Cc} \quad (1.19)$$

Скорость распространения

$$v = \frac{1}{t} = \frac{299,8}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (1.20)$$

Фазовый сдвиг (коэффициент) (кто хочет, может добавить  $j$ )

$$\beta = 2 * \pi * f * t = 2 * \pi * f * \sqrt{Lc * Cc} \quad (1.21)$$

Электрическое сопротивление кабеля [Ом/км]

$$Rc = 1000 * \frac{\rho}{Sw} \quad (1.22)$$

$\rho$  - удельное сопротивление материала жилы равно

$$\rho = \rho_0 * k_{scr.w} * \exp(-\alpha * (T - T_0)) \quad (1.23)$$

где  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления,  $1/^\circ\text{C}$ .  
 $\rho_0$  при  $T=20$  гр.Ц. равно 2.7 - 8.6 (2,7) для алюминия и его сплавов, 1.724 - для меди, 20.5 - для свинца, 1.6 - для серебра.

На высокой частоте, с учетом влияния скин-эффекта электрическое сопротивление кабеля составит, Ом/км

$$R_c = 1000 * \left[ \frac{\rho_{0w} * k_{scr.w}}{S_w} + \frac{1}{\pi} * \left( \frac{\rho_{0w} * k_{scr.w}}{D_w * \delta_w} + \frac{\rho_{0s} * k_{scr.s}}{D_s * \delta_s} \right) \right] \quad (1.24)$$

, где толщина скин-слоя в жиле и изоляции равны

$$\delta_w = \sqrt{\frac{\rho_{0w}}{\pi * \mu_v * \mu_r * f}} \quad \text{и} \quad \delta_s = \sqrt{\frac{\rho_{0s}}{\pi * \mu_v * \mu_r * f}} \quad (1.25)$$

Если жила и экран кабеля изготовлены из одного материала, то сопротивление кабеля будет равно

$$R_c = \rho_0 * \left[ \frac{k_{scr.w}}{S_w} + \sqrt{\frac{f * \mu_v}{\pi * \rho_0}} * \left( \frac{k_{scr.w}}{D_w} + \frac{k_{scr.s}}{D_s} \right) \right] \quad (1.26)$$

Коэффициент скрутки экрана зависит от его конструкции: плетеная оплетка, лента и т.д., и никогда не известен. Поэтому, хотя это может привести к значительным погрешностям вычислений, его придется брать равным 1.

Частота, на которой начинает проявляться скин-эффект, составляет

$$f_{skin} = \frac{\pi * \rho_0}{\mu_v * S_w^2 * \left( \frac{1}{D_w} + \frac{k_{scr.s}}{D_s * k_{scr.w}} \right)^2} \quad (1.27)$$

Проводимость изоляции кабеля равна [сим/км]

$$G_c = 2 * \pi * f * C_c * \text{tg}(\delta) * 10^{-6} \quad (1.28)$$

Где тангенс угла потерь для кабеля с полуизолирующим слоем находится из выражения

$$\begin{aligned} \text{tg}(\delta) &= \frac{C_{pi}}{C_i + C_{pi}} * \text{tg}(\delta_i) + \frac{C_i}{C_i + C_{pi}} * \text{tg}(C_{pi}) \\ C_{pi} &= \frac{\varepsilon_{pi} * \varepsilon_0 * \delta}{\Delta pi} \\ C_i &= \frac{\varepsilon_i * \varepsilon_0 * S_i}{\Delta i} \end{aligned} \quad (1.29)$$

(Я сколько не пытался посчитать тангенс потерь для кабеля с полуизолирующим слоем, у меня ни разу не получилось. Кто сумеет или знает, напишите, пожалуйста)

Постоянная распространения кабеля без отражений равна

$$\gamma = \sqrt{(Rc + j * \varpi * Lc) * (Gc + j * \varpi * Cc)} = \alpha + j * \beta \quad (1.30)$$

, где

$$\alpha = \sqrt{0.25 * \left[ Rc * Gc - Lc * Cc * \varpi^2 + \sqrt{(Rc^2 + Lc^2 * \varpi^2) * (Gc^2 + Cc^2 * \varpi^2)} \right]} \quad (1.31)$$

$$\beta = \sqrt{0.25 * \left[ -Rc * Gc + Lc * Cc * \varpi^2 + \sqrt{(Rc^2 + Lc^2 * \varpi^2) * (Gc^2 + Cc^2 * \varpi^2)} \right]} \quad (1.32)$$

В более компактной форме выражение для коэффициента затухания можно записать, как

$$\alpha = \frac{Rc}{2 * Zc} + \frac{Gc * Zc}{2} \quad (1.33)$$

Произведя соответствующие подстановки из выражений (1.26), (1.28), (1.6) и (1.9), и приведя (1.33) к каноническому виду

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 * \sqrt{f} + \alpha_2 * f \quad (1.34)$$

Приблизненно получим

$$\alpha_0 = \frac{8.338 * 10^{-3} * k_{scr.w} * \rho_0 * \sqrt{\varepsilon}}{Sw * \ln\left(\frac{Ds}{Dw * kf}\right)} \quad (1.35)$$

$$\alpha_1 = \frac{5.274 * 10^{-6} * \sqrt{\varepsilon} * \rho * \left(\frac{k_{scr.w}}{Dw} + \frac{k_{scr.s}}{Ds}\right)}{\ln\left(\frac{Ds}{Dw * kf}\right)} \quad (1.36)$$

$$\alpha_2 = 1.048 * 10^{-8} * tg(\delta) * \sqrt{\varepsilon} \quad (1.37)$$

Или в явном виде

$$\alpha = \frac{8.338 * 10^{-3} * k_{scr.w} * \rho_0 * \sqrt{\varepsilon}}{Sw * \ln\left(\frac{Ds}{Dw * kf}\right)} + \frac{5.274 * 10^{-6} * \sqrt{\varepsilon} * \rho * f * \left(\frac{k_{scr.w}}{Dw} + \frac{k_{scr.s}}{Ds}\right)}{\ln\left(\frac{Ds}{Dw * kf}\right)} + 1.048 * 10^{-8} * tg(\delta) * f * \sqrt{\varepsilon} \quad (1.38)$$

И в альтернативной форме

$$\alpha = \frac{k_{scr.w} * \rho_0 * \sqrt{\frac{Cc}{Lc}}}{2 * Sw} + \frac{\sqrt{\mu} * \rho_0 * \frac{Cc}{Lc} * f * \left(\frac{k_{scr.w}}{Dw} + \frac{k_{scr.s}}{Ds}\right)}{2 * \sqrt{\pi}} + \pi * \sqrt{Lc * Cc} * tg(\delta) * f \quad (1.39)$$

Если в данных на кабель  $\varepsilon$  отсутствует, а погонная емкость кабеля известна, то  $\varepsilon$  может быть вычислена по формуле

$$\varepsilon_c = 0,17975 * Cc * \ln\left(\frac{Ds}{Dw}\right) \quad (1.40)$$

, где  $C_c$  – практически всегда известная емкость кабеля, нФ/км

Если сечение жилы неизвестно, то его можно вычислить по диаметру жилы

$$S_w' = k_s * \frac{\pi * D_w^2}{4} \quad (1.41)$$

, где  $k_s$  – коэффициент заполнения жилы из профилированных проволок равен 0.9, для жил изготовленных из уплотненных сегментов – 0.84, для неуплотненных жил – 0.75 .

К поверочным расчетам можно отнести вычисление волнового сопротивления и емкости кабеля

$$Z_c' = \sqrt{\frac{L_c}{C_c}}$$
$$C_c' = \frac{1000 * \epsilon'}{18 * \ln\left(\frac{D_s}{D_w * k_{scr}}\right)} \quad (1.42)$$

Полная погонная индуктивность кабельной линии вычисляется по формуле

$$L_{cf} = 0.05 + 0,2 * \ln\left(\frac{2 * K_f * S_{12}}{D_w}\right) \quad (1.43)$$

, где  $S_{12}$  – расстояние между осями кабелей в линии, мм  
 $K_f$  – коэффициент формы «связки» из трех кабелей. Равен 1 – для треугольного расположения кабелей в линии (обычно вплотную друг к другу), и 1,26 – при горизонтальном расположении одиночных кабелей в линии.

Если данные по полной индуктивности кабеля в материалах производителя имеются, можно понять, для какого взаимного расположения кабелей в линии оно получено, и рассчитать расстояние между проводниками.

$$L_{cf_1} = 0.05 + 0,2 * \ln\left(\frac{2 * D_f}{D_w}\right) \quad (1.44)$$

, где  $D_f$  – наружный диаметр кабеля, мм

Если расчетное и каталожное значения  $L_{cf}$  будут близки, то линия представляет собой треугольник.

Если далеки, кабели в линии уложены горизонтально с расстоянием между осями

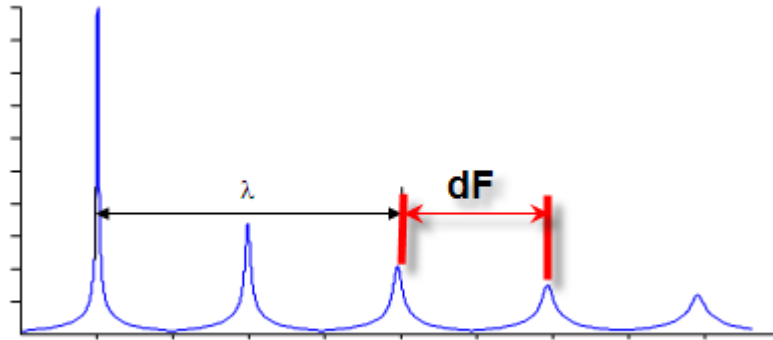
$$S_{12} = \frac{D_w * \exp(5 * L_{cf} - .25)}{2,52} \quad (1.45)$$

### Расчет первичных параметров силового кабеля

Иногда бывает необходимо по вторичным параметрам кабеля определить его первичные параметры.

Допустим, известна длина кабеля  $l_c$  [м].

Нагрузив кабель на сильно рассогласованную нагрузку (не более 0,1 от предполагаемого волнового сопротивления кабеля) можно либо измерить входной импеданс противоположного конца кабеля, либо его передаточную функцию. Абсолютные величины измерений значения не имеют, главное определить расстояние по частоте между максимумами функций  $dF$  [кГц].



Тогда скорость распространения в кабеле [м/с] составит

$$v = 2000 * dF * \lambda \quad (1.46)$$

А диэлектрическая проницаемость материала изоляции

$$\epsilon = \left( \frac{299800000}{v} \right)^2 \quad (1.47)$$

Если же, например, известны минимальное  $Z_n$  и максимальное  $Z_x$  значение волнового сопротивления (импеданса) кабеля, то его характеристическое волновое сопротивление будет равно  $Z_c = \sqrt{Z_n * Z_x}$ .

Далее, если есть возможность взять короткий отрезок (1 м) кабеля, то можно определить его погонные параметры:

- При разомкнутом удаленном конце можно измерить емкость кабеля  $C$ ;
- При замкнутом удаленном конце – индуктивность  $L$ .

Соответственно волновое сопротивление, время, скорость распространения и коэффициент формы будут равны:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{\frac{L}{C}} \\ t &= \sqrt{L * C} \\ v &= 1/t \\ Sf &= \frac{L}{1,2564} \end{aligned} \quad (1.48)$$

Диэлектрическую проницаемость можно найти из выражения (1.47) или по формуле

$$\epsilon = 0.0899 * C * L \quad (1.49)$$

«Добраться» до геометрических размеров кабеля можно либо с помощью линейки, что не всегда возможно и всегда неточно, либо измерив полную индуктивность кабеля  $L_{cf}$ .

Тогда диаметр жилы будет равен

$$D_w = 2 * K_f * S_{12} * \exp(0,25 - 5 * L_{cf}) \quad (1.50)$$

## Примеры расчета параметров силового кабеля

В каталоге одного из производителей приведены следующие таблицы данных для силовых кабелей 110кВ и 500кВ.

Сечение жилы	Диаметр жилы	Толщина изоляции	Диаметр по изоляции	Сечение экрана	Наружный диаметр кабеля	Вес кабеля (Al жила)	Вес кабеля (Cu жила)	Емкость	Зарядный ток на фазу при 50 Гц	Индуктивность		Волновое полное сопротивление
мм <sup>2</sup>	мм	мм	мм	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м	кг/м	мкФ/км	А/км	мГ/км	мГ/км	Ом

Таблица 29

Одножильные кабели на ном. напряжение 110 кВ ( $U_m = 123$ кВ)												
185	15.9	16.0	49.4	95	60.0	3.8	4.9	0.13	2.7	0.45	0.66	41.8
240	18	15.0	49.7	95	62.0	3.9	5.4	0.15	3.0	0.44	0.63	36.8
300	20.5	14.0	50	95	62.0	4.1	5.9	0.17	3.4	0.41	0.61	32.4
400	23.1	13.0	50.8	95	62.0	4.3	6.8	0.19	3.9	0.39	0.58	28.8
500	26.4	13.0	54.4	95	66.0	4.8	7.9	0.21	4.3	0.37	0.56	26.2
630	30.2	13.0	58.0	95	69.0	5.4	9.3	0.23	4.7	0.35	0.54	23.8
800	33.7	13.0	61.9	95	74.0	6.2	11.1	0.25	5.1	0.35	0.53	22.1
1000	37.9	13.0	66.1	95	79.0	7.0	13.2	0.28	5.5	0.34	0.51	19.9
1200	44	13.0	74.0	95	85.0	7.9	15.3	0.32	6.4	0.32	0.49	18.0
1400	49	13.0	79.0	95	93.0	9.1	17.8	0.35	6.9	0.32	0.48	16.5
1600	52	13.0	82.0	95	96.0	9.9	19.8	0.36	7.3	0.31	0.47	15.9
2000	56	13.0	86.0	95	100.0	11.2	23.6	0.39	7.7	0.30	0.46	14.8
2500	66	13.0	96.0	95	111.0	13.3	28.8	0.44	8.8	0.31	0.41	13.1
3000	72	13.0	102.0	95	117.0	15.2	33.8	0.47	9.4	0.31	0.39	12.2

Таблица 36

Одножильные кабели на ном. напряжение 500 кВ ( $U_m = 550$ кВ)												
800	33.7	34.0	103.9	185	120.0	13.6	18.5	0.13	11.8	0.44	0.58	41.6
1000	37.9	32.0	104.1	185	121.0	13.9	20.1	0.15	13.2	0.42	0.56	36.7
1200	44	31.0	110.0	185	129.0	14.8	22.3	0.17	15.2	0.40	0.54	32.8
1400	49	31.0	115.0	185	133.0	16.4	25.1	0.18	16.3	0.39	0.52	30.8
1600	52	31.0	118.0	185	137.0	17.4	27.3	0.19	16.9	0.38	0.51	29.4
2000	56	31.0	122.0	185	141.0	19.0	31.4	0.20	17.7	0.37	0.50	27.9
2500	66	31.0	132.0	185	152.0	21.7	37.2	0.22	19.8	0.36	0.48	25.1
3000	72	31.0	138.0	185	158.0	23.9	42.5	0.23	21.1	0.35	0.47	23.8

Казалось бы, все данные здесь уже есть.

Однако проведем поверочные расчеты.

Заявленная производителем диэлектрическая проницаемость изоляции равна 2,3. Вычислим параметры кабеля 110кВ с сечением жилы 185 по классическим формулам (1.10) и (1.11).

e	D <sub>w</sub>	D <sub>s</sub>	D <sub>f</sub>	S <sub>f</sub>	Z <sub>c</sub>	C <sub>c</sub>	L <sub>c</sub>	t	v	Z <sub>c</sub> '	C <sub>c</sub> '
2.3	15.9	49,4	60	,18	44,8	113	,23	5,1	198	44.8	113

Налицо не совпадение величин Z<sub>c</sub> и C<sub>c</sub> из каталога и полученных в результате поверочного расчета.

Объясняется это очень просто: конструкция кабеля значительно сложнее обычной коаксиальной модели, для описания которой используются классические формулы.



Учет конструктивных особенностей кабелей выполняется введением ряда поправочных коэффициентов в классические выражения (например, см. [Передача информации по распределительным сетям 6-35 кВ - 1971. \(Ефремов Е.В.\)](#)). Но инженерный расчет параметров кабеля при этом практически невозможен (из-за отсутствия точных данных о конструктивных особенностях кабелей).

Приведенные выше выражения (1.6) - (1.50) позволяют во многом решить эту проблему. Например:

**Проведем полный расчет данного кабеля:**

По формуле (1.7) находим коэффициент формы - 1,08;  
 По (1.8) коэффициент скрутки - 1,08;  
 По (1.14) толщину полуизолирующего слоя - 0,74 мм;  
 По (1.6) коэффициент формы - 0,17;  
 По (1.15) диэлектрическую проницаемость полуизолятора - 2,48;  
 По (1.12) или (1.13) эквивалентную диэлектрическую проницаемость кабеля - 2,47;  
 По (1.23) и (1.22) находим сопротивление кабеля - 0,16 Ом/км;  
 По (1.10) волновое сопротивление кабеля - 41,8 Ом;  
 По (1.11) погонную емкость кабеля - 130 пФ;  
 По (1.16) погонную индуктивность - 0,23 мкГн;  
 По (1.18) постоянную времени распространения - 5,06 нс;  
 И, наконец, скорость распространения по (1.20) - 197,7.  
 По (1.42) проверяем волновое сопротивление и емкость кабеля - 41,7 Ом и 130 пФ соответственно.  
 Таким образом, мы получили полное совпадение каталожных и рассчитанных параметров кабеля.

Наибольшее сомнение вызывают рассчитанные фазовые параметры кабеля: если постоянную распространения определять по формуле (1.19), получим совсем другое значение - 5,42 нс, и скорость распространения 184,4. В эти цифры я верю больше.

Однако **существует возможность существенно упростить вычисления** ® ©, определив некое виртуальное значение диэлектрической проницаемости изоляции, характеризующей свойства кабеля. В данном случае из (1.40) оно равно 2,65. Тогда, вычислив коэффициент формы по классической формуле

$$Sf = \frac{\ln\left(\frac{Ds}{Dw}\right)}{2 * \pi} = 0,18; \tag{1.51}$$

а волновое сопротивление и погонную емкость по (1.10) и (1.11), получим Zc=41.8 и Cc=130 пФ. Для вычисления остальных параметров используем выражения (1.19) и (1.20).

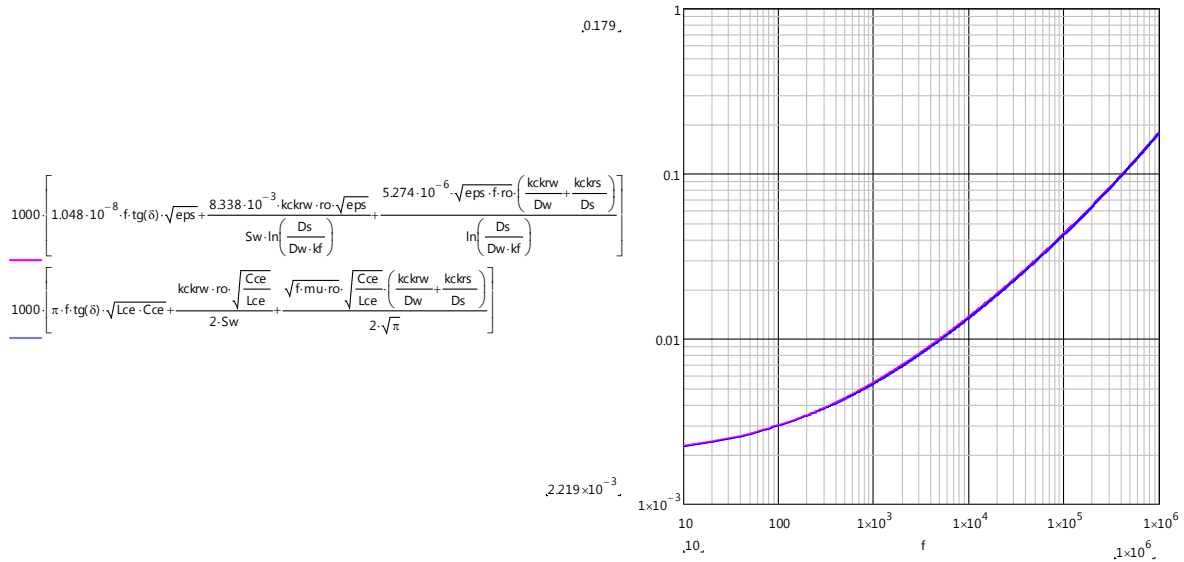
e	Dw	Ds	Df	Sf	Zc	Cc	Lc	t	v	Zc'	Cc'
2.65	15.9	49,4	60	,18	41,8	130	,23	5,4	184	41.8	130

Полученный результат полностью совпадает с каталожным. Что и требовалось доказать.

Поскольку производитель указывает полные индуктивности линии, можно определить расстояние между кабелями в линии. Сначала по формуле (1.44) приблизительно определяем полную индуктивность линии при треугольной укладке кабелей вплотную друг к другу. Полученное значение индуктивности составляет 0,45 мГ/км, что полностью совпадает с данными из каталога.

Теперь по формуле (1.45) можно определить, для какого расстояния в линии между кабелями, получено значение полной индуктивности при горизонтальном расположении фаз. Оно составит 133 мм.

Рассчитаем километрическое затухание кабеля по формуле (1.38) для полного расчета, и по формуле (1.39) для упрощенного



**Рис. 1 Километрическое затухание кабеля 110 кВ, Неп/км**

Как видим результаты полностью совпадают.

Аналогичные расчеты можно выполнить для кабеля 110кВ с сечением жилы 1000 мм<sup>2</sup> и 500кВ кабеля.

Вычислим вторичные параметры кабеля 110кВ с сечением жилы 1000.

e	Dw	Ds	Df	Sf	Zc	Cc	Lc	t	v	Zc'	Cc'
2.3	37,9	66,1	79	,09	22,0	230	,11	5,1	198	22,0	230

Опять налицо не совпадение величин Zc и Cc из каталога и полученных в результате поверочного расчета.

Расчет диэлектрической проницаемости изоляции по формуле (1.40) дает значение 2,8. Тогда

e	Dw	Ds	Df	Sf	Zc	Cc	Lc	t	v	Zc'	Cc'
2.8	37.9	66,1	79	,09	19,9	280	,11	5,6	179	19,9	280

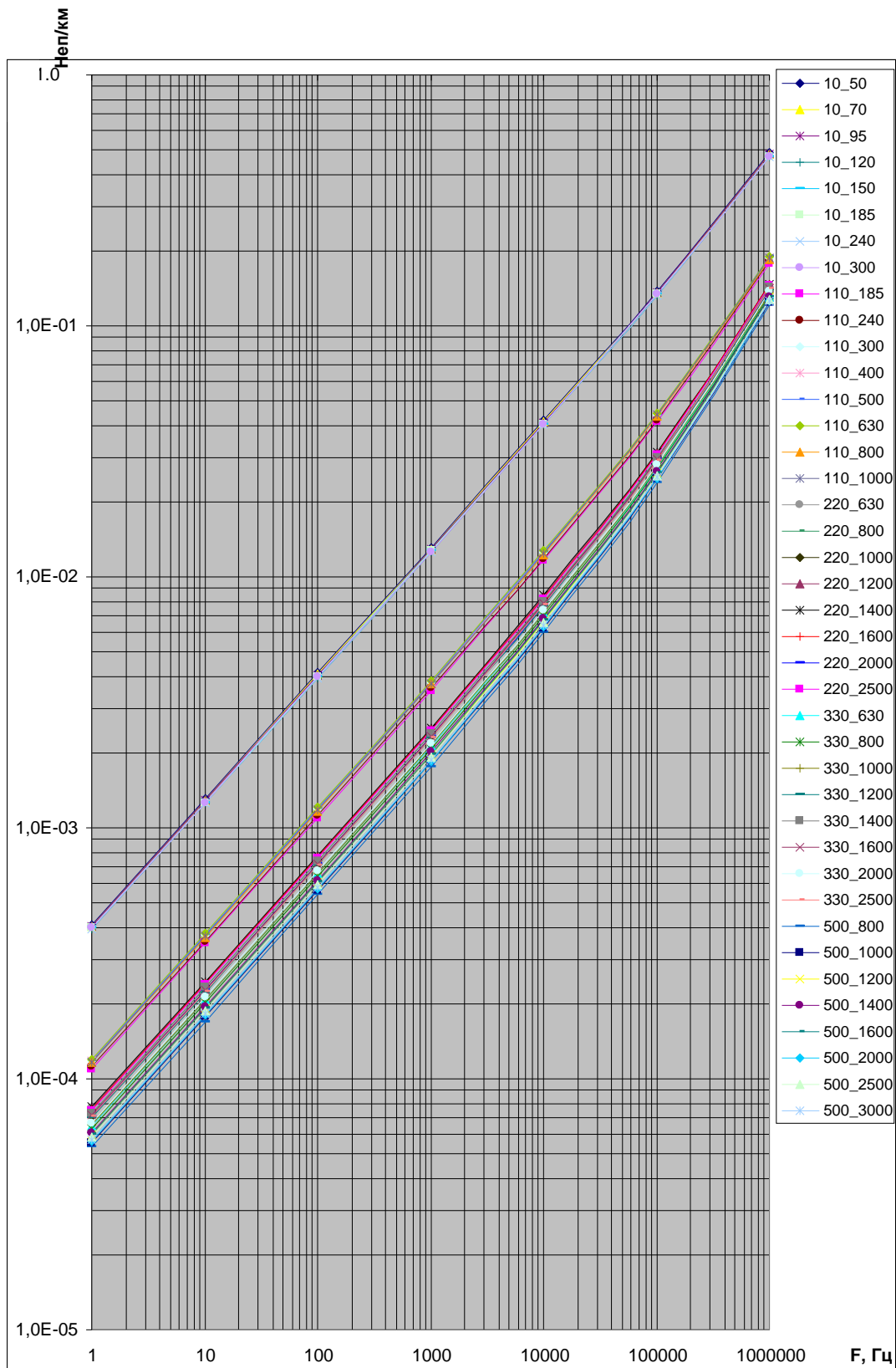
Далее по формуле (1.44) приблизительно определяем полную индуктивность линии при треугольной укладке кабелей вплотную друг к другу. Полученное значение индуктивности составляет 0,34 мГ/км, что полностью совпадает с данными из каталога.

Теперь по формуле (1.45) определяем, для какого расстояния в линии между кабелями, получено значение полной индуктивности при горизонтальном расположении фаз. Оно составит 150 мм.

Для 500кВ кабеля с сечением жилы 800 мм<sup>2</sup> величина эквивалентной диэлектрической проницаемости изоляции составит 2,63, а для сечения жилы 3000 мм<sup>2</sup> 2,69 вместо указанных в каталоге 2,3.

Таким образом можно рассчитать параметры всех кабелей данного производителя (см. Рис. 2)





**Рис. 3 Километрические затухания кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена компании АББ**

На Рис. 5 показана зависимость километрического затухания от тангенса потерь в диапазоне от типичного для кабелей с изоляцией из

СПЭ значения  $tg(\delta) = 0.0004$  до предельно допустимого значения  $tg(\delta) = 0.008$ .

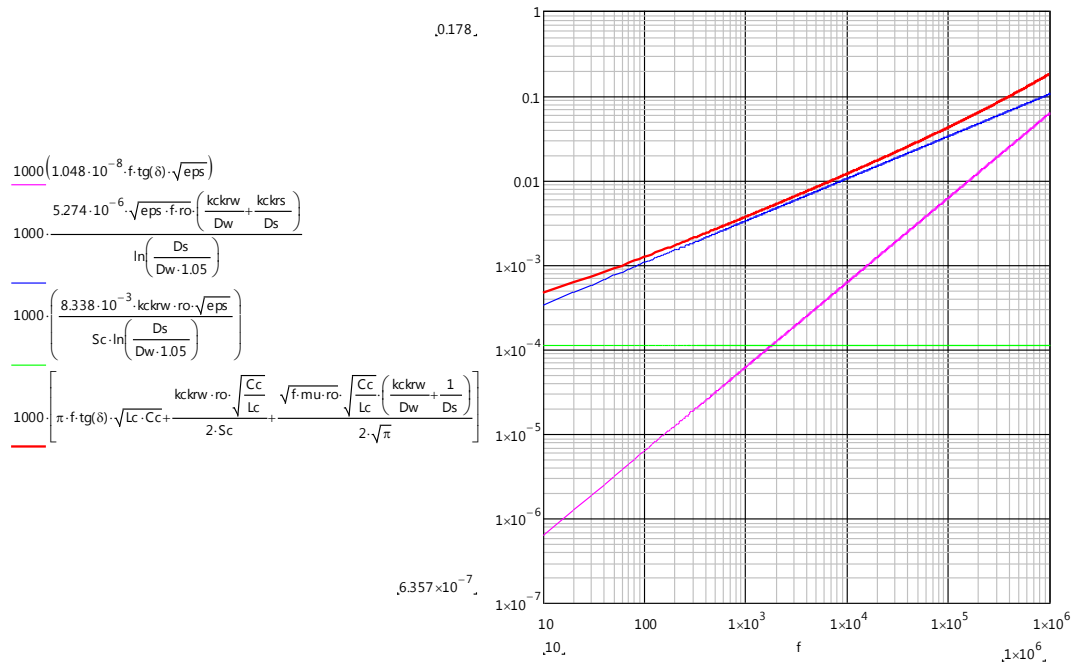


Рис. 4 Влияние различных составляющих на величину километрического затухания кабеля 110кВ сечением 185 мм<sup>2</sup>, Неп/км

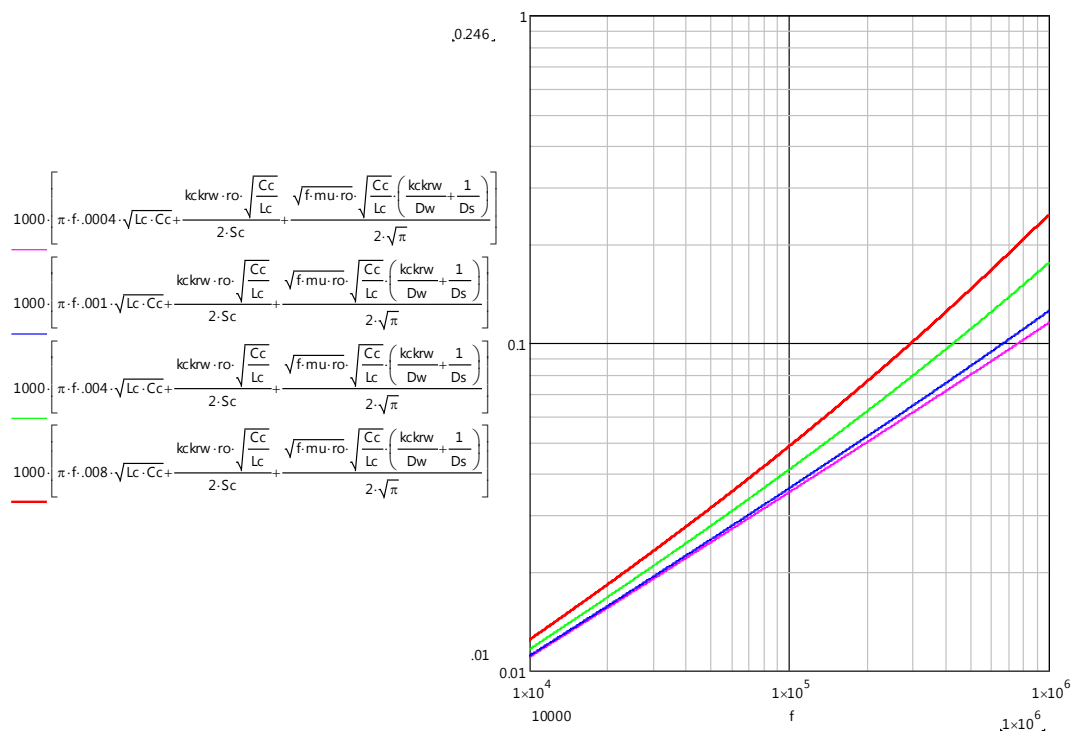


Рис. 5 Влияние тангенса потерь  $tg(\delta) = 0.0004...0.008$  на величину километрического затухания кабеля 110кВ сечением 185 мм<sup>2</sup>, Неп/км

Теперь для тех же напряжений силовых кабелей рассмотрим данные другого производителя.

### НАПРЯЖЕНИЕ 64/110 (123) кВ, АЛЮМИНИЕВЫЙ ПРОВОДНИК

#### Характеристики кабелей

Номинальное сечение	Диаметр проводника	Номинальная толщина изоляции	Электрическое сопротивление при 20°C	Электрическая емкость	Алюминиевый экран			Проволочный экран Cu/Pb			Проволочный экран Cu/Al			Алюминиевый гофрированный экран			Свинцовый экран		
					Сечение экрана*	Внешний диаметр кабеля*	Вес кабеля*	Сечение экрана* Cu	Внешний диаметр кабеля*	Вес кабеля*	Сечение экрана* Cu/Al	Внешний диаметр кабеля*	Вес кабеля*	Сечение экрана*	Внешний диаметр кабеля*	Вес кабеля*	Сечение экрана* Cu	Внешний диаметр кабеля*	Вес кабеля*
мм <sup>2</sup>	мм	мм	Ом/км	мкФ/км	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м
240 R	18.4	16	0.1250	0.16	180	66	4	85	72	9	100	68	5	330	77	4	800	73	13
300 R	20.5	16	0.1000	0.17	180	67	4	85	73	9	100	69	5	340	77	5	810	73	13
400 R	23.3	16	0.0778	0.19	190	69	4	85	74	10	95	71	5	340	79	5	810	75	13
500 R	26.4	15	0.0605	0.21	190	71	5	80	76	10	95	72	5	380	82	5	810	76	14
630 R	30.3	15	0.0469	0.24	180	73	5	80	79	11	90	76	6	390	85	6	800	79	14
800 R	34.7	15	0.0367	0.27	170	78	6	75	84	12	90	80	7	420	90	7	810	83	15
1000 R	38.2	15	0.0291	0.28	180	82	7	70	88	14	85	84	8	470	95	8	800	87	16
1200 R	41.4	15	0.0247	0.29	190	86	8	65	92	15	85	88	8	490	99	9	790	90	16
1600 R	48.9	15	0.0186	0.33	170	95	10	50	102	18	80	98	10	580	110	11	800	100	19

\* Значения указаны в качестве примера  
R: круглая жила  
S: сегментированная жила

### НАПРЯЖЕНИЕ 290/500 (550) кВ, АЛЮМИНИЕВЫЙ ПРОВОДНИК

#### Характеристики кабелей

Номинальное сечение	Диаметр проводника	Номинальная толщина изоляции	Электрическое сопротивление при 20°C	Электрическая емкость	Алюминиевый экран			Проволочный экран Cu/Pb			Проволочный экран Cu/Al			Алюминиевый гофрированный экран			Свинцовый экран		
					Сечение экрана*	Внешний диаметр кабеля*	Вес кабеля*	Сечение экрана* Cu	Внешний диаметр кабеля*	Вес кабеля*	Сечение экрана* Cu/Al	Внешний диаметр кабеля*	Вес кабеля*	Сечение экрана*	Внешний диаметр кабеля*	Вес кабеля*	Сечение экрана* Cu	Внешний диаметр кабеля*	Вес кабеля*
мм <sup>2</sup>	мм	мм	Ом/км	мкФ/км	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м	мм <sup>2</sup>	мм	кг/м
1000 R	38.2	37	0.0291	0.13	420	133	15	150	141	31	225	136	17	1210	149	18	1840	140	36
1200 R	41.4	36	0.0247	0.14	420	133	16	150	141	31	225	136	17	1210	149	18	1840	140	36
1600 S	48.9	32	0.0186	0.17	420	134	17	150	142	32	225	137	18	1260	150	19	1850	141	37
2000 S	54.0	32	0.0149	0.19	430	137	18	140	145	34	225	140	20	1280	153	21	1850	144	38
2500 S	63.5	32	0.0119	0.21	420	148	21	110	157	39	215	151	23	1480	165	24	1830	155	41
3000 S	70.0	32	0.0099	0.22	450	155	23	95	164	42	210	158	25	1650	173	27	1820	161	43

\* Значения указаны в качестве примера  
R: круглая жила  
S: сегментированная жила

Здесь заявленная диэлектрическая проницаемость изоляции составляет 2,4. Попробуем определить так ли это для кабеля 110кВ сечением жилы 240 мм<sup>2</sup>.

Доступными параметрами кабеля являются Dw, Di и Cc.

Это позволяет по формуле (1.17) вычислить Ds = 51,9 мм, где Di = 1,5 мм. Далее по выражению (1.40) вычислить эквивалентную диэлектрическую проницаемость изоляции ε = 2,98 и остальные параметры кабеля.

e	Dw	Ds	Df	Sf	Zc	Cc	Lc	t	v	Zc'	Cc'
2.98	18,4	51,9	66	,17	36	160	,21	5,8	174	36	160

Налицо совпадение расчетного значения и каталожного значений погонной емкости. В качестве дополнительной проверки можно вычислить ε по выражению (1.49). Получим то же значение, что и ранее.

Параметры кабеля, вычисленные при ε = 2,4, существенно отличаются от каталожных

e	Dw	Ds	Df	Sf	Zc	Cc	Lc	t	v	Zc'	Cc'
2.4	18,4	51,9	66	,17	40,1	129	,21	5,2	194	40,1	129

К сожалению, правильность расчета в этом случае можно проверить, только проведя одно из рассмотренных выше измерений, так как замкнутого решения нет.

Так же оказалось, что у этих кабелей сечение жилы указано «округленно». Близкое к истине значение получается при расчете сечения провода по формуле

$$S_w = \frac{D_w}{2 * \sqrt{\frac{R_c}{\pi * \rho_0}}} \quad (1.52)$$

Приблизительно (когда совсем ничего не получается) параметры кабелей (с точностью 5-10%) можно оценить следующим образом:

$$Dwi = 0.75559904 + 0.000041721583 * Dw^{2.5} \quad (1.53)$$

$$Di = \frac{1}{0.017171677 + 1.1635175 * \frac{\ln(U_{VL})}{U_{VL}}} \quad (1.54)$$

По (1.17) находим внутренний диаметр экрана  $D_s$ ,  
 по (1.40) эквивалентную диэлектрическую проницаемость,  
 по (1.51) коэффициент формы,  
 по (1.10) волновое сопротивление и  
 по (1.11) емкость кабеля.

Далее, по (1.16) вычисляется емкость кабеля... ну и т.д.  
 Собственно, теперь можно провести и полный расчет (проверочный)... но результат получится тот же ☺.

Ucab	Sw	e	Dw	Di	Ds	Ss	Df	Zc	Cc	Kf	Dw	Epl	Ee	Kscr	ro	Rc	Sf	Zc	Cc	Lc	t	v	Zc'	Cc'	Lc'	Kf	S12	A0	A1	A2
110	240	2.40	18.4	16	52.0	180	66	36.0	160	1.114	0.82	2.69	2.68	1,1095	2,7	0,125	0.15	36.0	160	0.2079	5.4593	183.17	36.044	159.78	0.63	1,26	133.0	1,734E-12	1,1462E-07	7,247E-11
	239.7	2.39															0.17	36.0	160	0.2079	5.7669	173.4	36.044	159.78	0.44	1	66.0			
	300	2.40	20.5	16	54.2	180	67	33.8	170	1.103	0.83	2.68	2.67	1,1056	2,7	0,100	0.14	33.8	170	0.1943	5.45	183.49	33.808	169.77	0.61	1,26	133.0	1,4789E-12	1,1126E-07	7,222E-11
	298.5	2.97															0.15	33.8	170	0.1943	5.7472	174	33.808	169.76	0.43	1	67.0			
	400	2.40	23.3	16	57.0	190	69	30.7	190	1.107	0.86	2.72	2.71	1,1084	2,7	0,078	0.13	30.7	190	0.179	5.4898	182.15	30.693	189.74	0.58	1,26	133.0	1,2674E-12	1,1021E-07	7,328E-11
	384.7	3.06															0.14	30.7	190	0.179	5.8316	171.48	30.693	189.74	0.41	1	69.0			
	500	2.40	26.4	15	58.2	190	71	27.4	210	1.085	0.91	2.69	2.68	1,1075	2,7	0,061	0.11	27.4	210	0.1581	5.457	183.25	27.439	209.71	0.56	1,26	133.0	1,1024E-12	1,1196E-07	7,241E-11
	494.3	2.98															0.13	27.4	210	0.1581	5.7621	173.55	27.439	209.71	0.39	1	71.0			
	630	2.40	30.3	15	62.2	180	73	24.5	240	1.091	0.97	2.75	2.73	1,1192	2,7	0,047	0.1	24.5	240	0.1439	5.5112	181.45	24.488	239.67	0.53	1,26	133.0	9,576E-13	1,1246E-07	7,385E-11
	644.3	3.10															0.11	24.5	240	0.1439	5.8771	170.15	24.488	239.67	0.36	1	73.0			
800	2.40	34.7	15	66.8	170	78	22.0	270	1.09	1.05	2.78	2.76	1,1338	2,7	0,037	0.09	22.0	270	0.131	5.5437	180.38	22.025	269.63	0.50	1,26	133.0	8,3313E-13	1,1239E-07	7,473E-11	
834.1	3.18															0.1	22.0	270	0.131	5.9467	168.16	22.025	269.63	0.35	1	78.0				
1000	2.40	38.2	15	70.5	180	82	20.9	280	1.075	1.13	2.74	2.72	1,1114	2,7	0,029	0.09	20.9	280	0.1224	5.5008	181.73	20.91	279.62	0.48	1,26	133.0	6,9581E-13	1,0755E-07	7,357E-11	
1031.2	3.08															0.1	20.9	280	0.1224	5.8549	170.81	20.911	279.61	0.34	1	82.0				
1200	2.40	41.4	15	75.4	190	86	20.3	290	1.077	2.00	2.77	2.74	1,1097	2,7	0,025	0.08	20.3	290	0.1199	5.5202	181.15	20.332	289.61	0.47	1,26	133.0	6,0741E-13	1,0239E-07	7,409E-11	
1213.0	3.13															0.1	20.3	290	0.1199	5.8962	169.6	20.332	289.60	0.33	1	86.0				
500	1000	2.40	38.2	37	114.5	420	133	41.1	130	1.036	1.13	2.48	2.48	1,1114	2,7	0,029	0.17	41.1	130	0.2194	5.2539	190.34	41.086	129.82	0.48	1,26	133.0	3,5413E-13	4,784E-08	6,712E-11
	1031.2	2.56														0.17	41.1	130	0.2194	5.3411	187.23	41.086	129.82	0.44	1	133.0				
	1200	2.40	41.4	36	117.4	420	133	38.6	140	1.046	2.00	2.51	2.51	1,1097	2,7	0,025	0.16	38.6	140	0.2084	5.2836	189.26	38.584	139.81	0.47	1,26	133.0	3,2008E-13	4,7564E-08	6,788E-11
	1213.0	2.62														0.17	38.6	140	0.2084	5.4017	185.13	38.585	139.81	0.42	1	133.0				
	1600	2.40	48.9	32	116.9	420	134	32.0	170	1.045	2.00	2.53	2.53	1,1374	2,7	0,019	0.13	32.0	170	0.1743	5.3038	188.55	32.018	169.77	0.43	1,26	133.0	2,9046E-13	5,1626E-08	6,84E-11
	1651.1	2.66														0.14	32.0	170	0.1743	5.443	183.72	32.018	169.76	0.39	1	134.0				
	2000	2.40	54.0	32	122.0	420	137	29.3	190	1.06	2.00	2.59	2.58	1,1242	2,7	0,015	0.12	29.3	190	0.163	5.3627	186.47	29.288	189.74	0.42	1,26	133.0	2,5437E-13	5,1473E-08	6,993E-11
	2037.2	2.78														0.13	29.3	190	0.163	5.5646	179.71	29.288	189.74	0.37	1	137.0				
	2500	2.40	63.5	32	131.5	420	148	26.3	210	1.049	2.00	2.58	2.57	1,1814	2,7	0,012	0.11	26.3	210	0.1456	5.3454	187.08	26.328	209.71	0.38	1,26	133.0	2,2599E-13	5,1722E-08	6,948E-11
	2680.6	2.75														0.12	26.3	210	0.1456	5.5288	180.87	26.328	209.71	0.36	1	148.0				
3000	2.40	70.0	32	138.0	420	155	24.8	220	1.038	2.00	2.54	2.54	1,1879	2,7	0,010	0.1	24.8	220	0.1357	5.3142	188.18	24.838	219.70	0.36	1,26	133.0	1,9929E-13	5,0655E-08	6,867E-11	
3239.7	2.68														0.11	24.8	220	0.1357	5.4643	183	24.839	219.69	0.35	1	155.0					

В таблице рассчитанные/аппроксимированные значения выделены голубым цветом.

На приведенном ниже рисунке (Рис. 6) показаны километрические затухания рассматриваемых кабелей.

Для сравнения на рисунке утолщенными линиями показаны километрические затухания с предыдущего графика (Рис. 3).

Видно, что затухания имеют одинаковый характер, и мало различаются по абсолютным значениям. Это объясняется, прежде всего, тем, что при расчетах использовалось одинаковое значение тангенса потерь 0,004, в то время как у реальных кабелей различных производителей они могут быть разными. Фактически данные кривые можно рассматривать как «худший» случай.

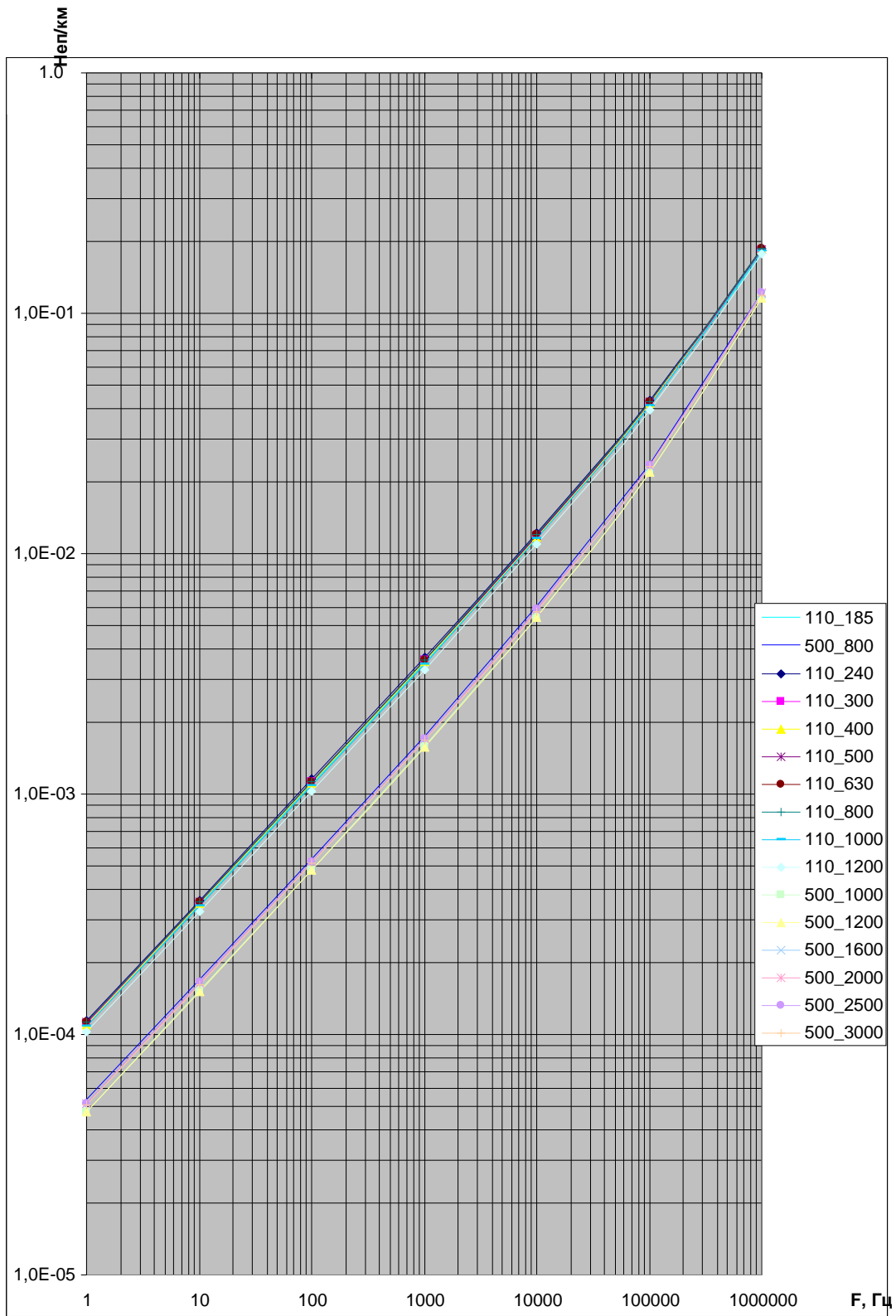


Рис. 6 Километрические затухания кабелей 110 и 500 марки Nexans