Направляющие системы передачи и их компоненты

Савин Евгений Зиновьевич

ЛИТЕРАТУРА

Савин Е.З., Линии железнодорожной связи : учеб. Пособие / Е.З. Савин. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2017. – 260 с.

Структура дисциплины:

1 раздел. Направляющие системы передачи

2 раздел. Волоконные световоды

3 раздел. Электромагнитная совместимость

4 раздел. Коррозия подземных кабельных сооружений

В О П Р О С Ы

к зачету по дисциплине "Направляющие системы передачи и их компоненты»

1. Направляющие системы передачи электромагнитных сигналов связи.
2. Физические процессы в НСП.
3. Типы и классы электромагнитных волн.
4. Уравнение однородной линии.
5. Волновое сопротивление и коэффициент распространения. Зависимость вторичных параметров от частоты.
6. Поверхностный эффект и эффект близости.
7. Первичные параметры цепей симметричной конструкции.
8. Основные зависимости первичных параметров двухпроводных цепей линий связи.
9. Принцип действия световодов. Числовая апертура.
10. Типы волоконных световодов.
11. Затухание волоконных световодов.
12. Дисперсия в волоконных световодах.
13. Определение длины регенерационного участка.
14. Магистральные волоконно-оптические кабели.
15. Природа взаимного влияния между цепями связи. Первичные параметры влияния.
16. Вторичные параметры влияния.

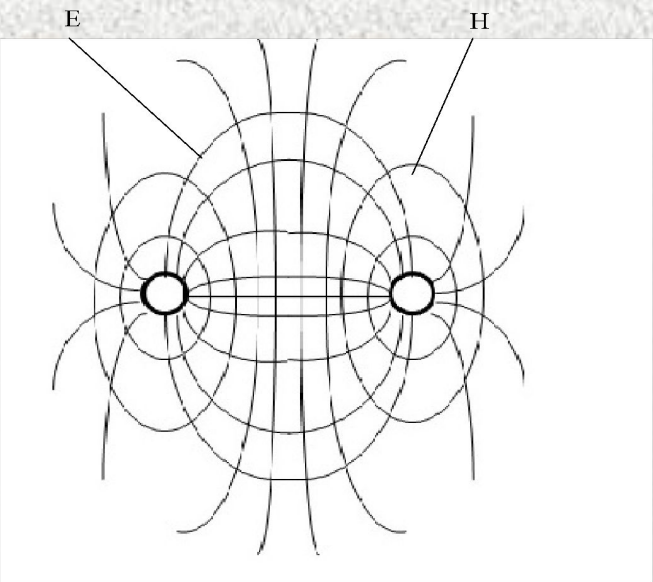
17 Основное уравнение влияния между цепями связи.
18. Зависимость переходного затухания от длины линии и частоты.
19. Косвенные влияния.
20. Симметрирование кабельных цепей.
Емкостные связи и асимметрии.
21. Симметрирование кабельных цепей методом скрещивания.
22. Конденсаторное симметрирование.
23. Концентрированное симметрирование.
24. Электрическое влияние высоковольтных линий и способ его расчета.
25. Магнитное влияние высоковольтных линий и способы его расчета.
26. Опасное влияние ЛЭП на линии связи и меры защиты.
27. Мешающие влияния ЛЭП на линии связи и меры защиты.
28. Опасные влияния ЭлЖД переменного тока на линии связи и меры защиты.
29. Мешающие влияния электрических железных дорог однофазного переменного тока на линии связи и меры защиты.
30. Механизм образования молнии. Параметры линейной молнии.
31. Влияние грозовых разрядов на воздушные линии связи и меры защиты.
32. Влияние грозовых разрядов на кабельные линии связи и меры защиты.
33. Почвенная коррозия подземных кабельных сооружений и меры защиты.
34. Коррозия блуждающими токами подземных кабельных сооружений и меры защиты.

Направляющие системы передачи электромагнитных сигналов связи

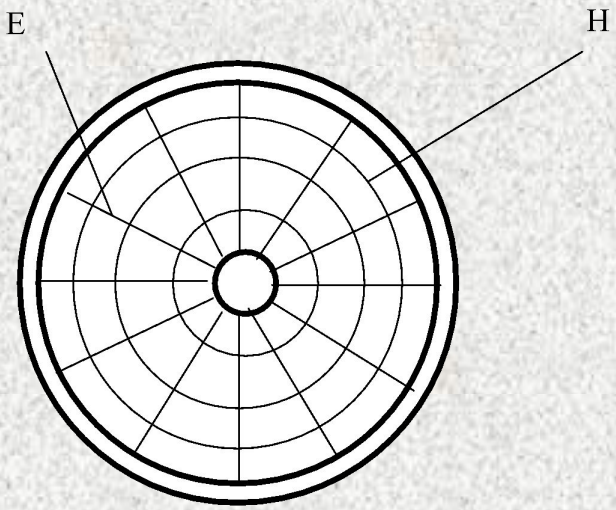
Современные направляющие системы передачи (НСП) подразделяются на следующие виды:

- НСП симметричной конструкции (СК);
- коаксиальные кабели (КК);
- сверхпроводящие кабели (СПК);
- волноводы (В);
- диэлектрические волноводы (ДВ);
- волоконные световоды (ВС);
- линии поверхностной волны (ЛПВ);
- полосковые линии или ленточные кабели (ПЛ или ЛК);
- радиочастотные кабели (РК).

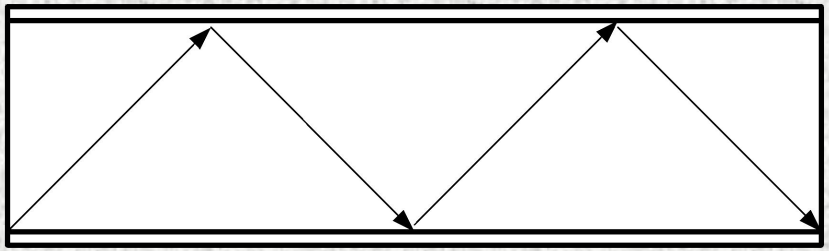
НСП симметричной конструкции



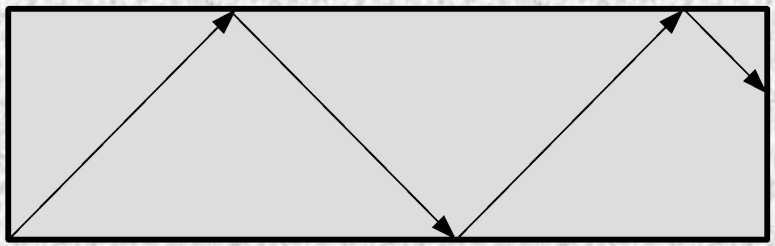
Коаксиальные кабели



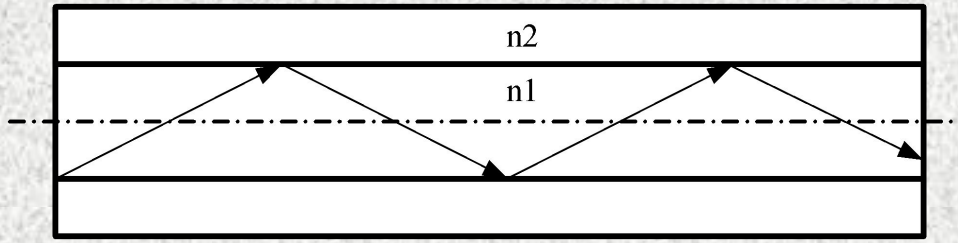
Волноводы



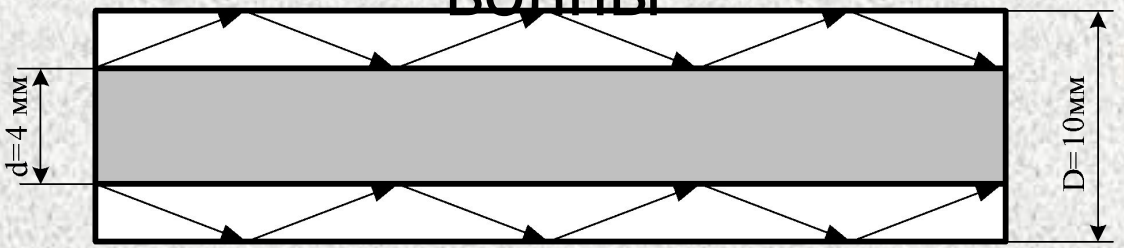
Диэлектрические волноводы



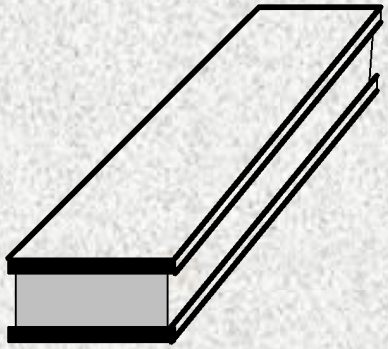
Волоконные световоды

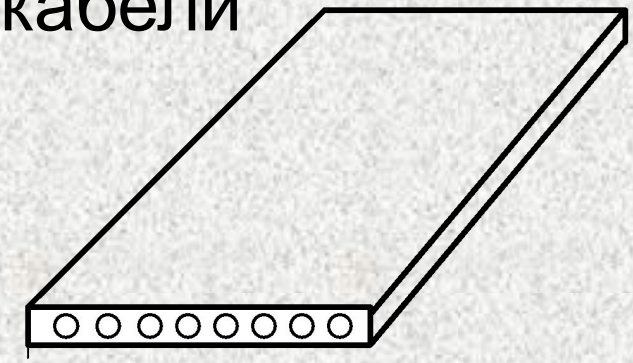


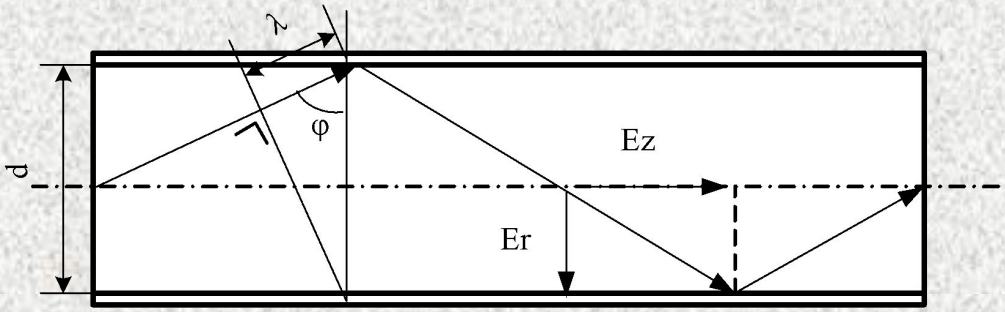
Линии поверхностной волны



Полосковые линии или ленточные кабели

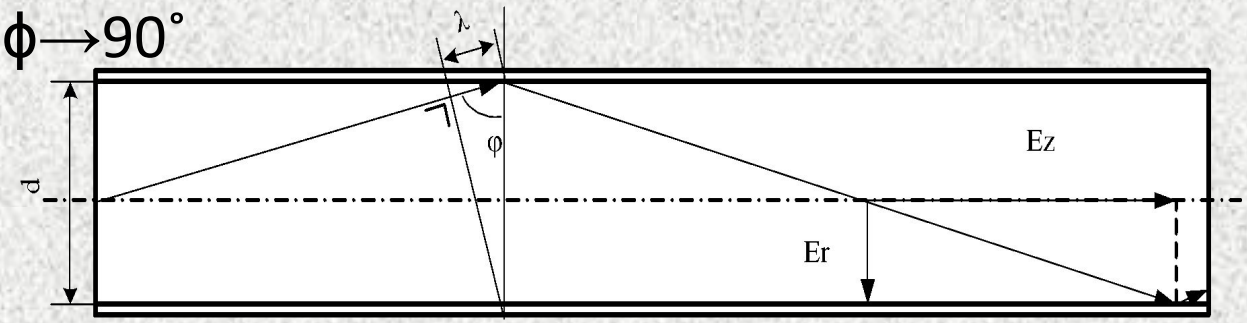




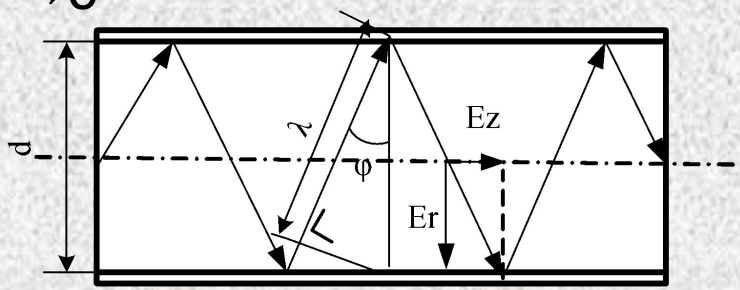


$\cos\phi=\lambda/d.$

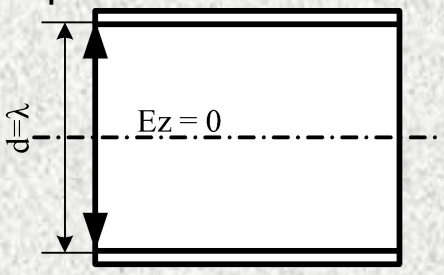
1. Для области сверхвысоких частот, когда $f\to\infty$, а длина волны $\lambda\to 0$, тогда $\phi\to 90^\circ$

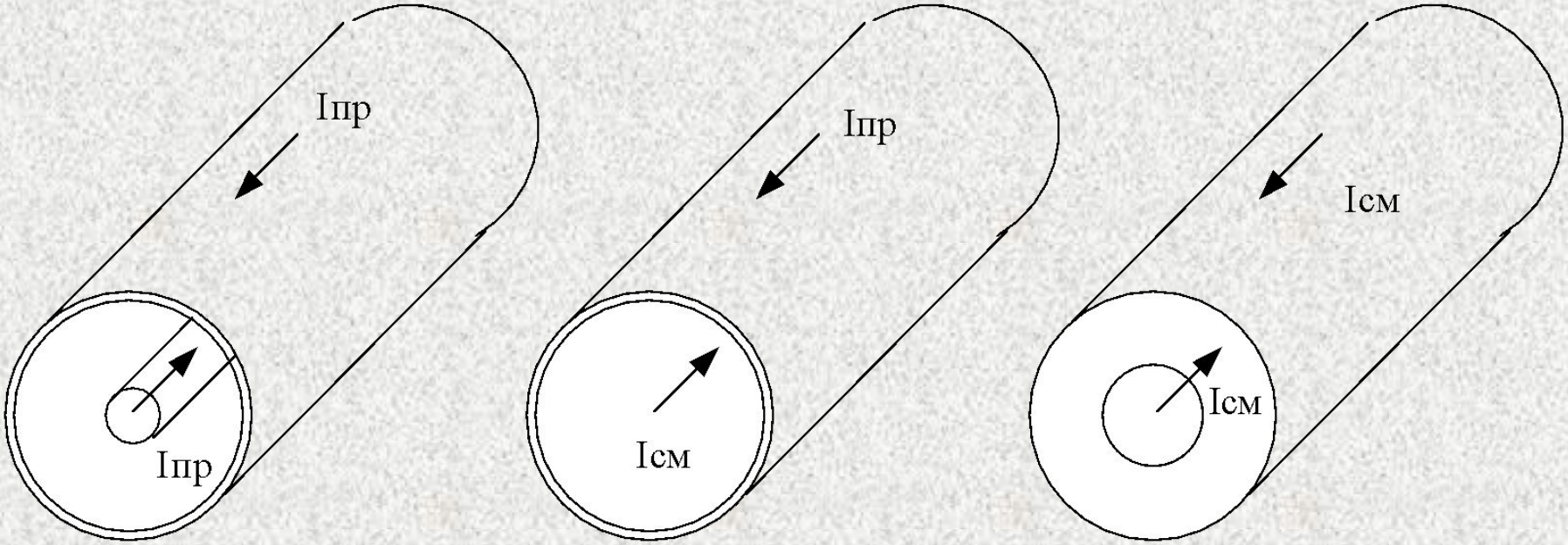


2. С уменьшением частоты и приближением ее для конкретной НСП к критическому значению ($f\to f_{кр}$) длина волны $\lambda\to d$, тогда $\phi\to 0$



3. При соответствии частоты критической ($f=f_{кр}$) длина волны $\lambda=d$ и угол $\phi=0$



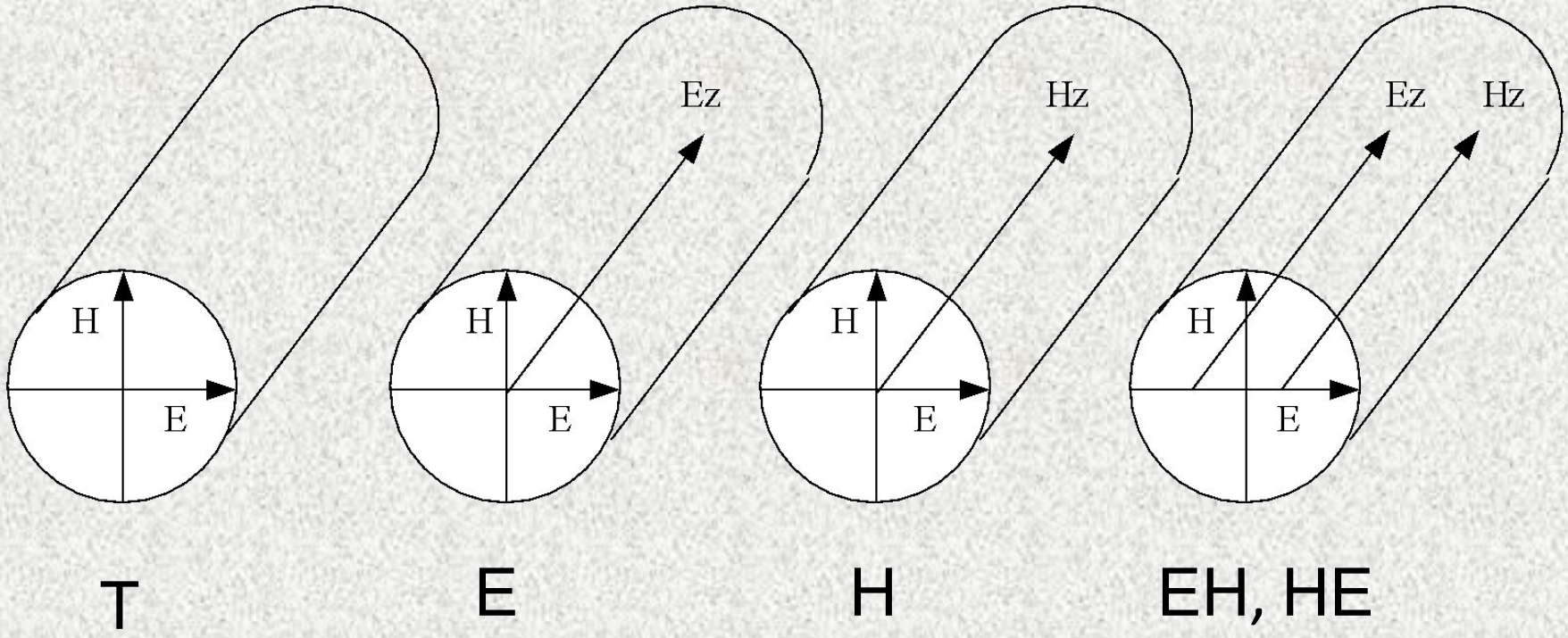


λ>d λ=d λ<d

Длина волны	Вид линии связи	Токи	Тип НСП
λ>d	Двухпроводная	$I_{пр}>I_{см}$	СК, КК
λ<d	Однопроводная или диэлектрическая линия	$I_{см}>I_{пр}$	В, ДВ, ВС

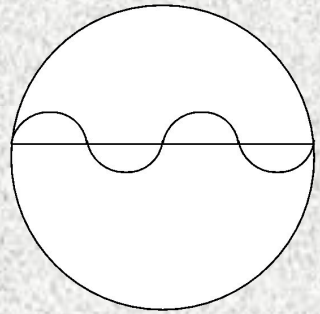
Типы и классы электромагнитных волн.

- Т- основная, поперечно электромагнитная волна;
- Е – электрическая волна;
- Н – магнитная волна;
- ЕН или НЕ – смешанная (гибридная) волна.

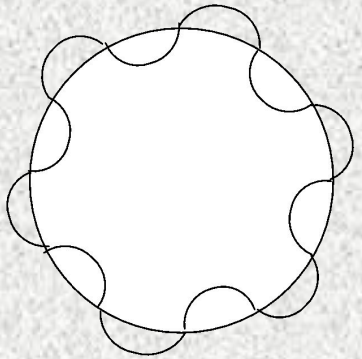


Тип волны характеризуется индексами m и n.

Индекс **n** указывает на число полных изменений поля по окружности НСП, а индекс **m** – на число полных изменений поля по диаметру НСП

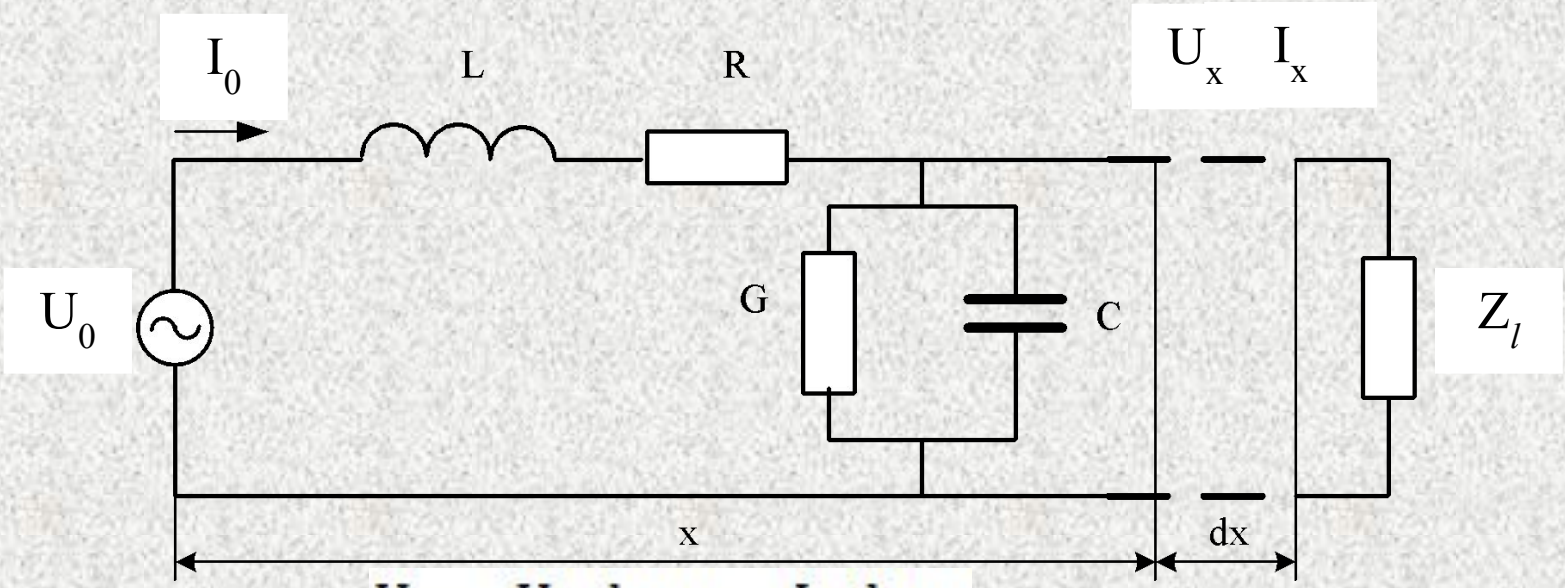


m=2



n=6

Уравнение однородной линии



$$U_x = U_0 \operatorname{ch}\gamma x - I_0 \operatorname{sh}\gamma x$$

$$I_x = I_0 \operatorname{ch}\gamma x - I_0 \frac{U_0}{Z_в} \operatorname{sh}\gamma x$$

$$Z_l = Z_в = Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$$

$$U_x = U_0(\operatorname{ch}\gamma x - \operatorname{sh}\gamma x)$$

$$I_x = I_0(\operatorname{ch}\gamma x - \operatorname{sh}\gamma x)$$

$$U_x = U_0 e^{-\gamma x}$$

$$I_x = I_0 e^{-\gamma x}$$

$x =$ ⊠

$$U_l = U_0 e^{-\gamma l}$$

$$I_l = I_0 e^{-\gamma l}$$

$$\frac{U_l}{U_0} = e^{-\gamma l}, \quad \frac{I_l}{I_0} = e^{-\gamma l}, \quad \frac{P_l}{P_0} = e^{-\gamma l},$$

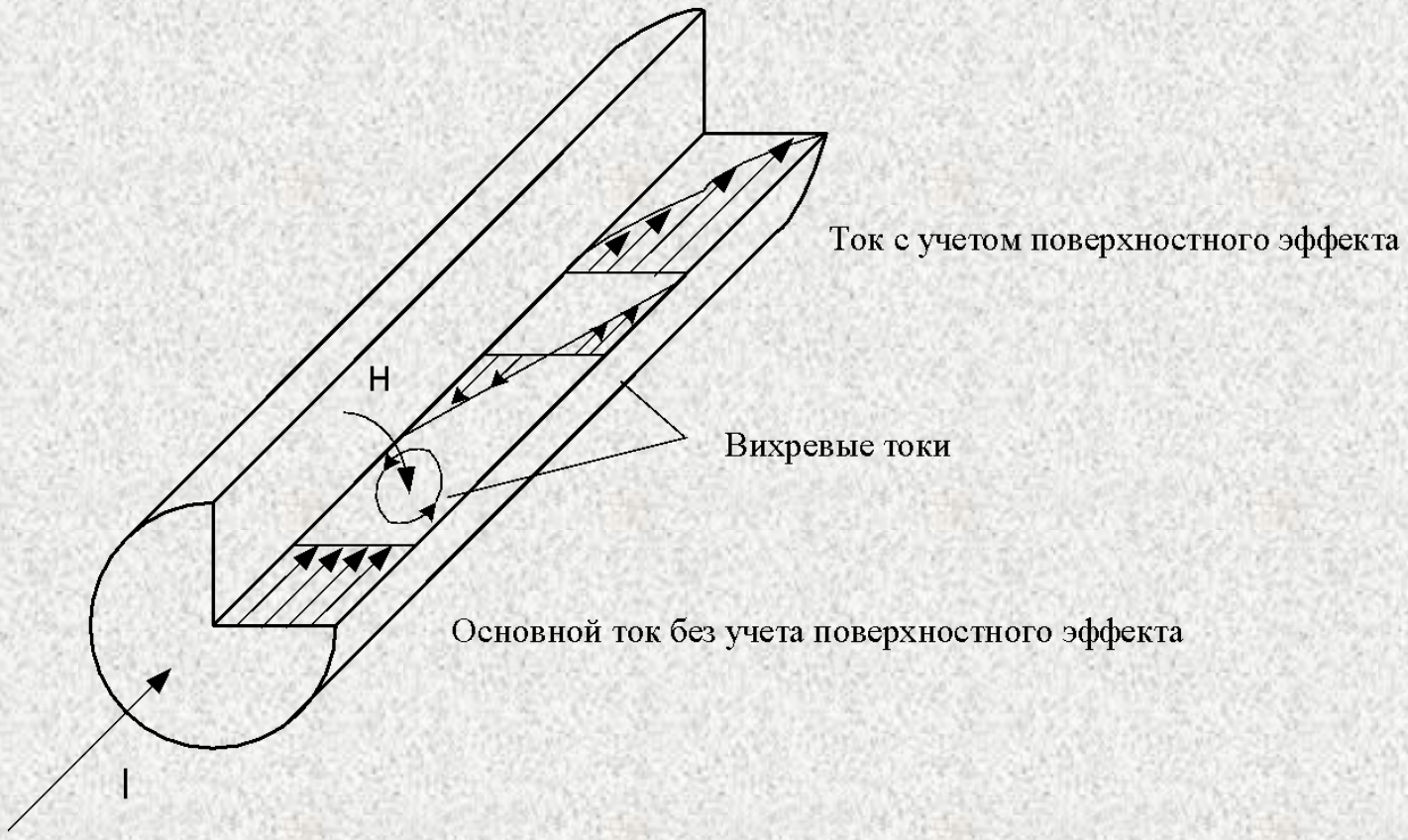
Электромагнитные процессы в двухпроводных цепях связи.

При распространении электромагнитной энергии в двухпроводных цепях возникают следующие явления и эффекты:

- поверхностный эффект;
- эффект близости;
- воздействие на параметры цепи окружающих металлических масс.

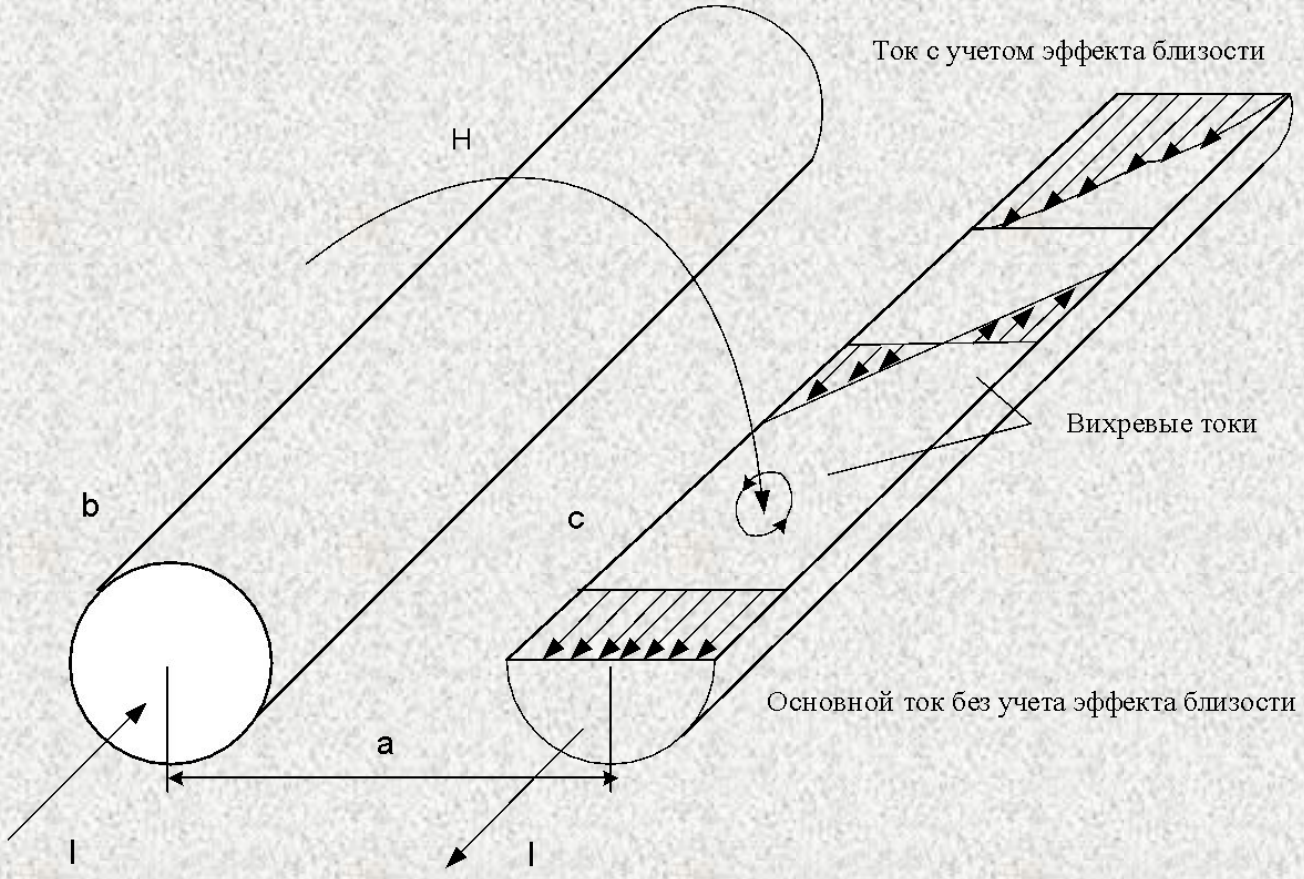
1. Поверхностный эффект.

Поверхностный эффект обусловлен действием внутреннего магнитного поля.



2. Эффект близости.

Эффект близости обусловлен действием внешнего магнитного поля.



Сопротивление двухпроводной кабельной цепи

$$R = 2R_0\chi\left[1 + F(kr) + \frac{pG(kr)\left(\frac{d}{a}\right)^2}{1 - H(kr)\left(\frac{d}{a}\right)^2}\right] + R_м$$

, Ом/км

$$R = R_0 + R_{пэ} + R_{эб} + R_м$$

Индуктивность двухпроводной кабельной цепи

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

$$L = L_{внеш} + L_{внут}$$

Емкость двухпроводной цепи

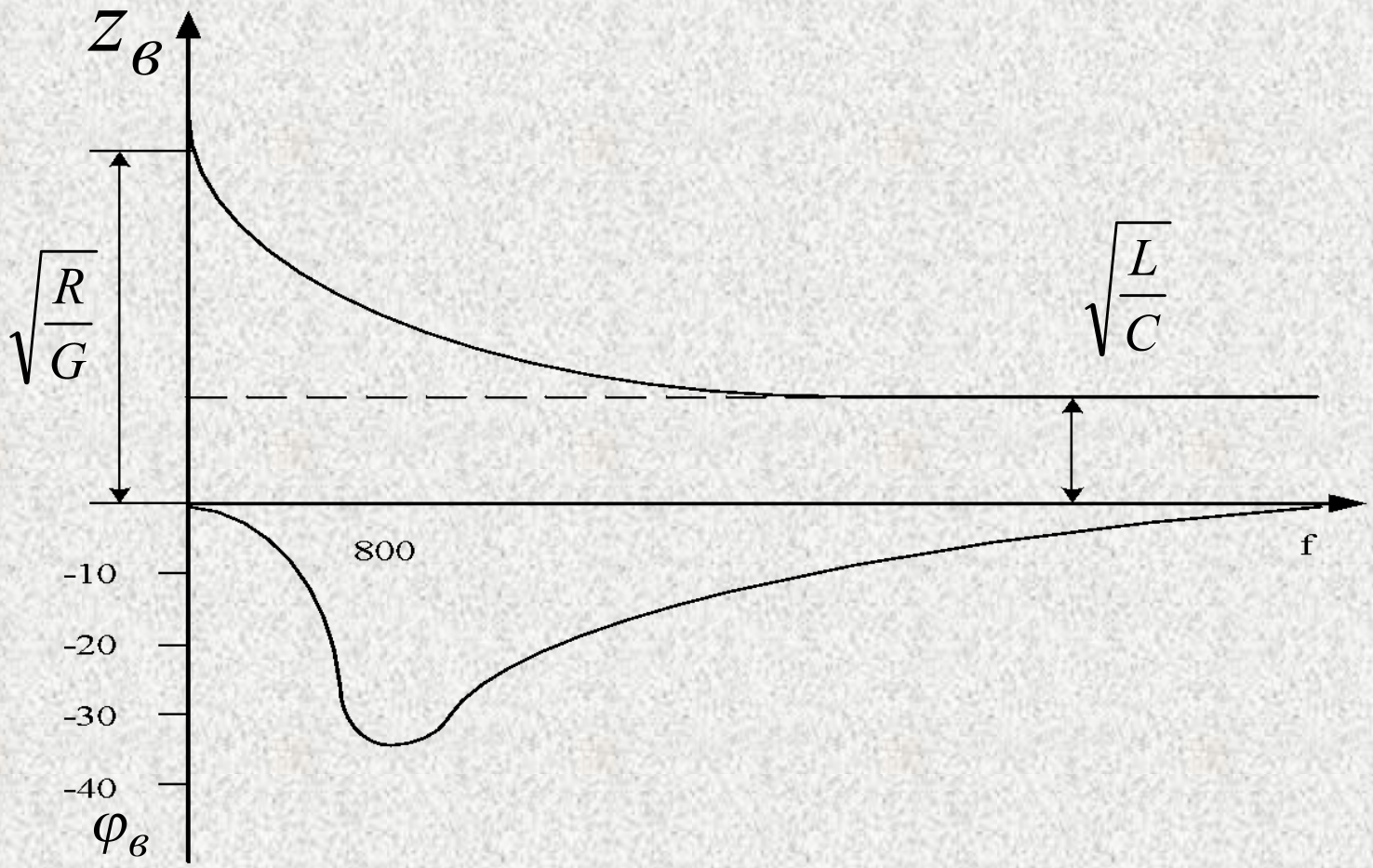
$$C = \frac{\chi \varepsilon 10^{-6}}{36 \ln \left(\frac{a - r}{r} \psi \right)} \quad , \text{Ф/км},$$

Проводимость изоляции кабельных цепей

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta \quad , \text{См/км},$$

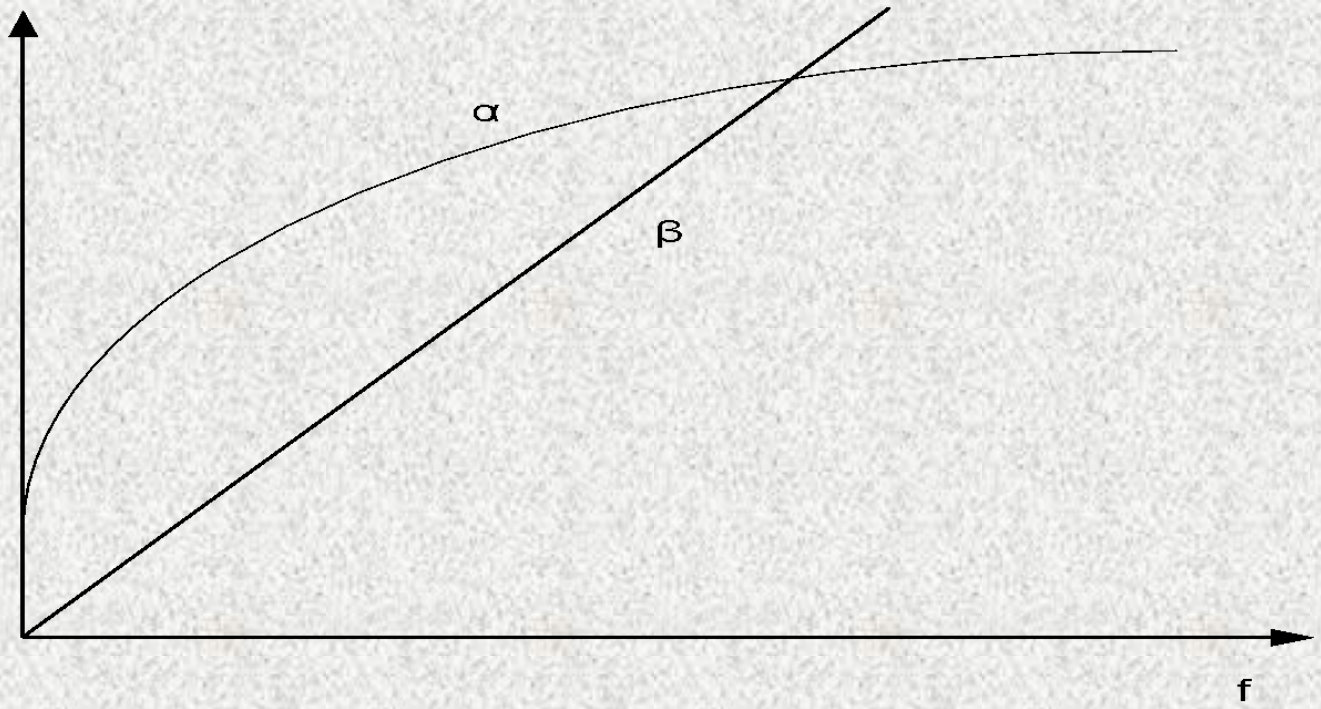
Вторичными параметрами цепей связи являются волновое сопротивление и коэффициент распространения

$$Z_в = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}}$$

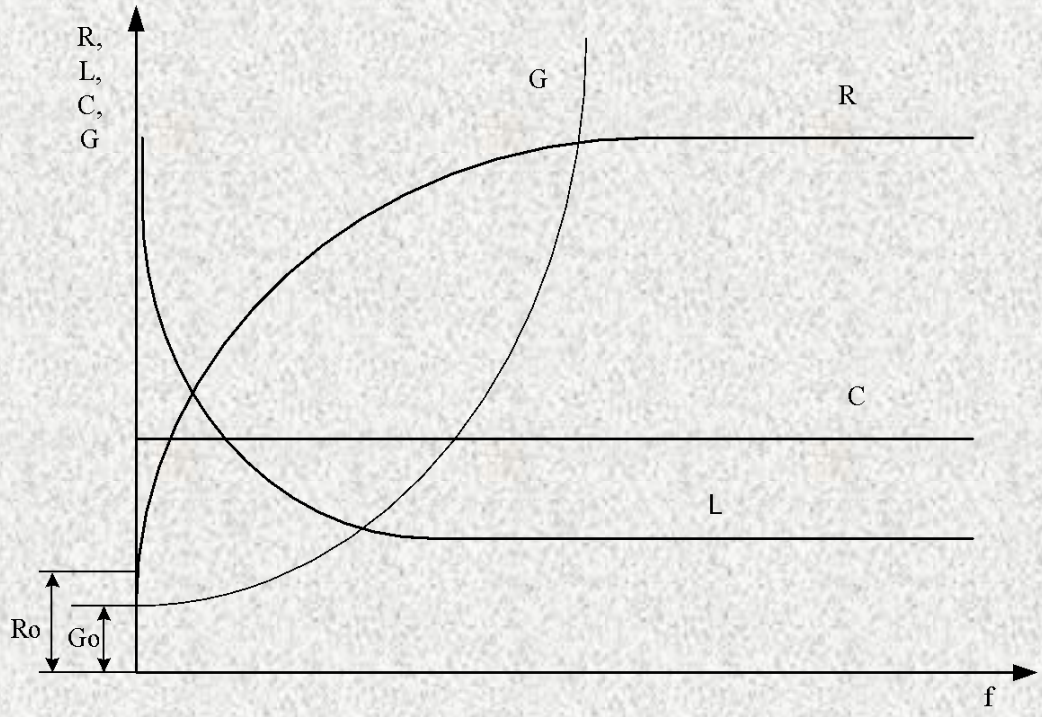


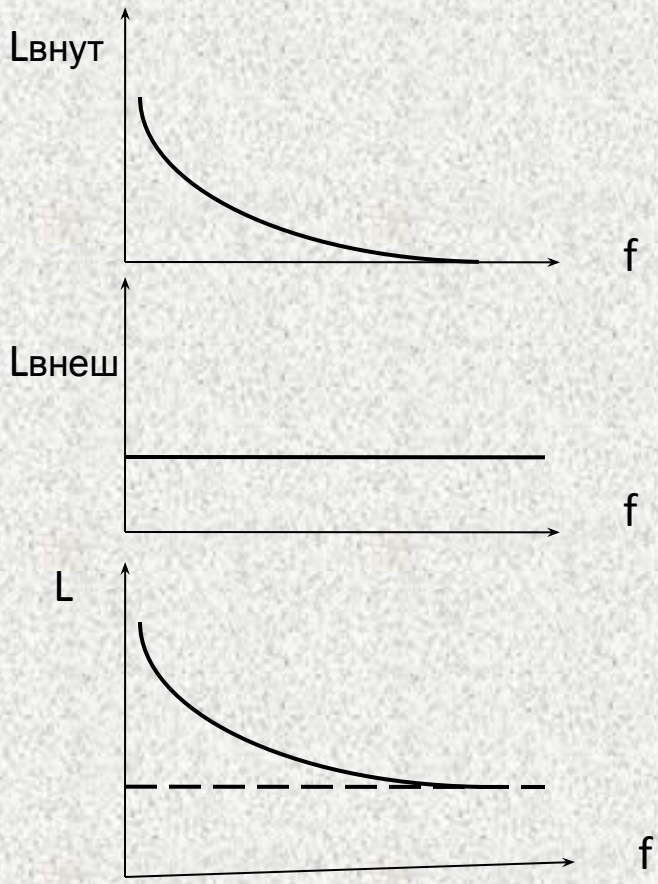
$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$$

$$\alpha = \left(\frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}\right)8{,}69 \qquad \beta = \omega\sqrt{LC}$$



Зависимость первичных параметров от частоты тока.



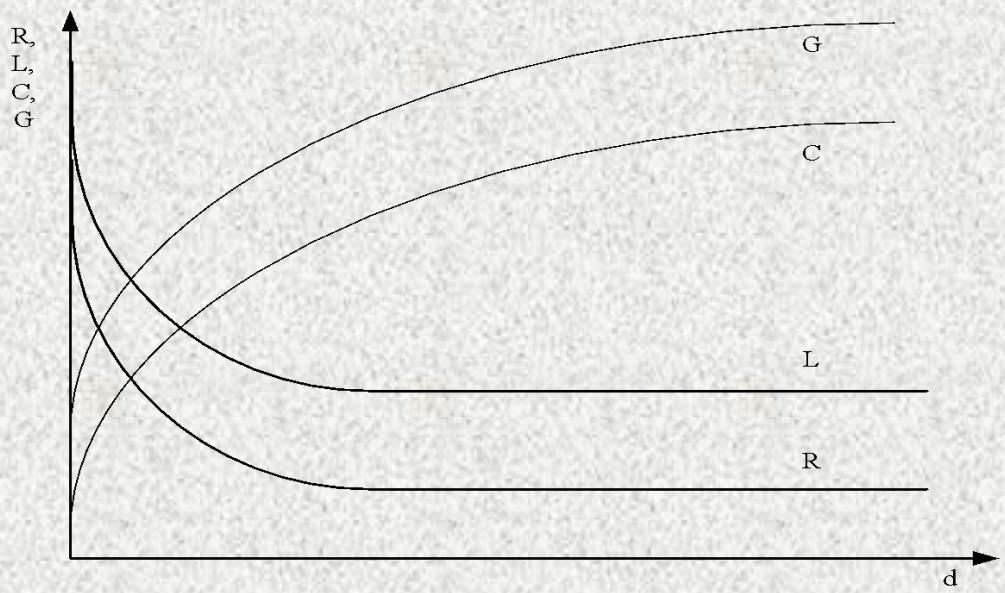


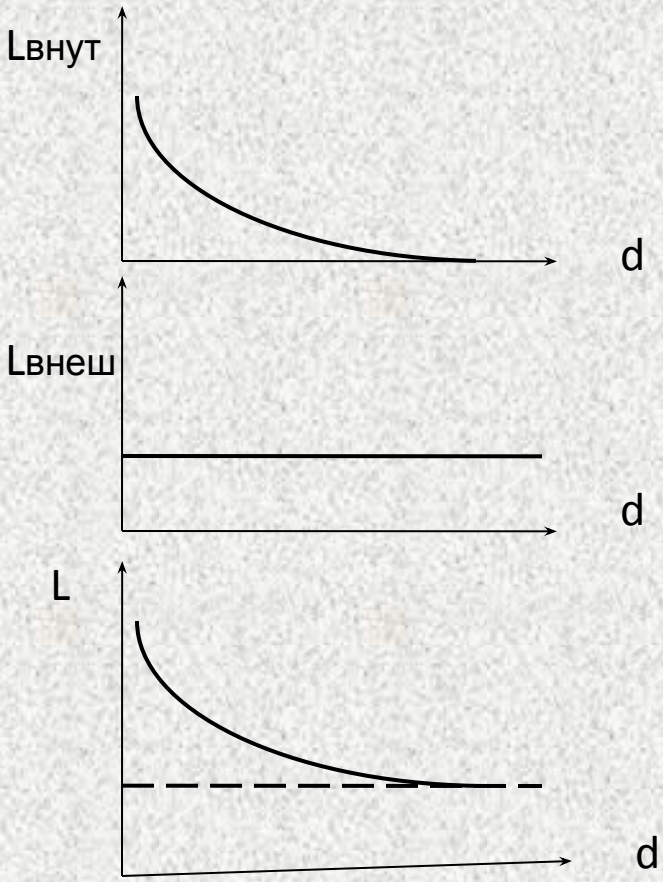
$$R = R_0 + R_{пэ} + R_{эб} + R_м$$

$$L = L_{внеш} + L_{внут}$$

$$G = \omega C tg\delta$$

Зависимость первичных параметров от диаметра проводников



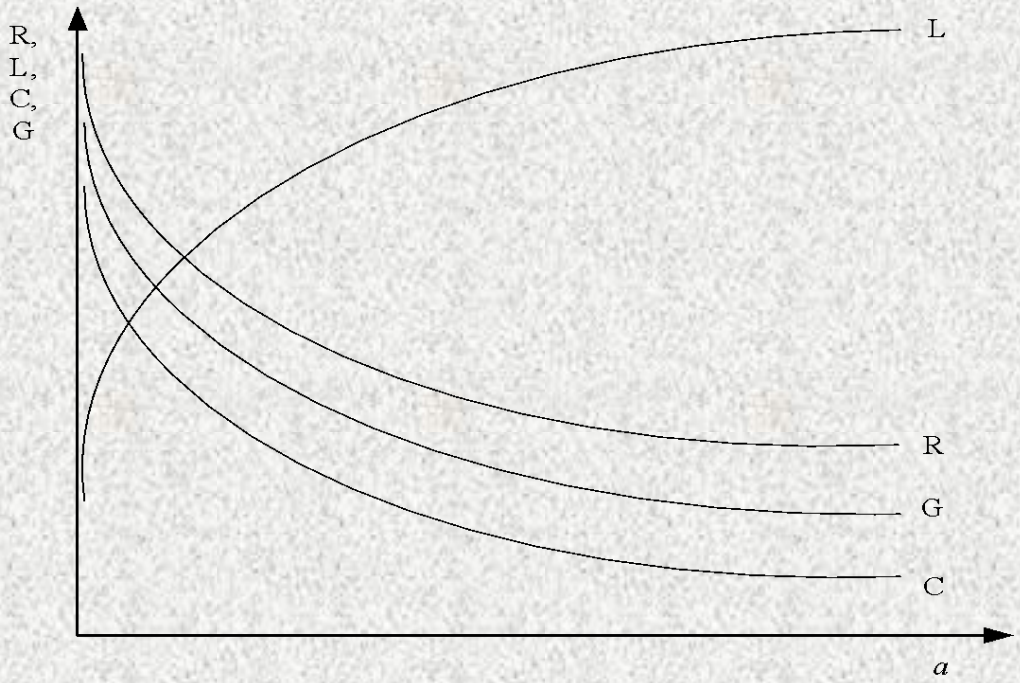


$$R = R_0 + R_{пэ} + R_{эб} + R_м$$

$$L = L_{внеш} + L_{внут}$$

$$G = \omega C tg\delta$$

Зависимость первичных параметров от расстояния между проводниками



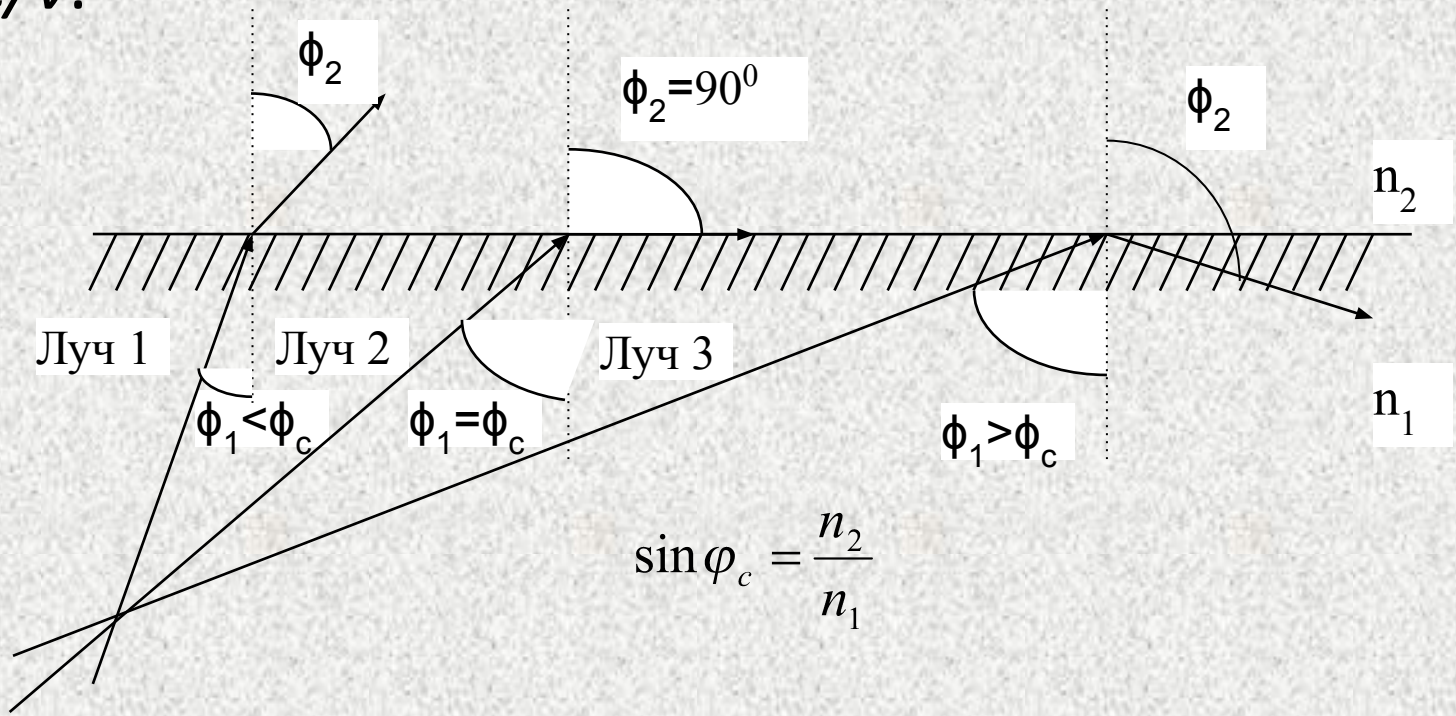
$$R = R_0 + R_{пэ} + R_{эб} + R_м$$

$$L = L_{внеш} + L_{внут}$$

$$G = \omega C tg\delta$$

Принцип действия световодов.

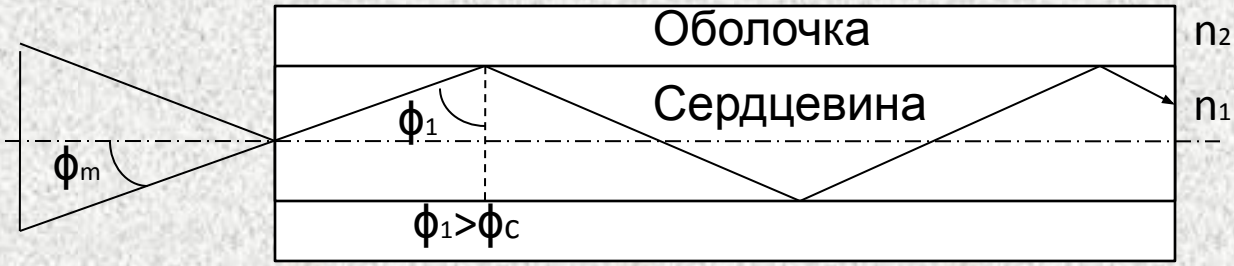
Показатель преломления (n) прозрачного вещества представляет собой отношение скорости света в вакууме (*c*) к скорости света в данном веществе (*v*), то есть *n=c/v*.



$n_1 > n_2$

$$\frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\sin\varphi_c = \frac{n_2}{n_1}$$



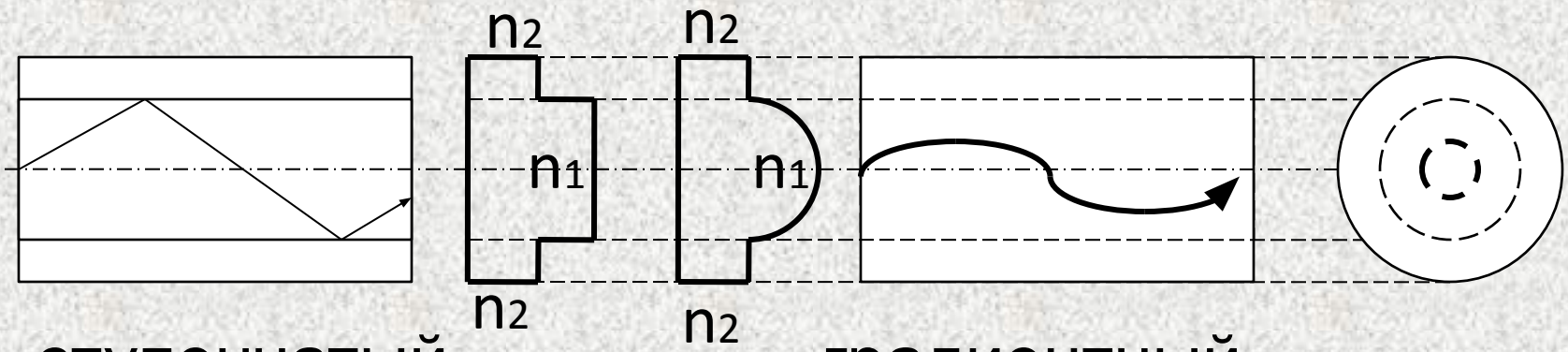
$$Sin\varphi_m = NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Типы волоконных световодов.

$$N = \left(\frac{2\pi n_1 a}{\lambda}\right)^2 \Delta \qquad \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

$2a \approx \lambda, \quad N = 1$ - одномодовый

$2a >> \lambda, \quad N > 20$ - многомодовый



ступенчатый

градиентный

Оптические волокна с несмещенной дисперсией

SF G.652

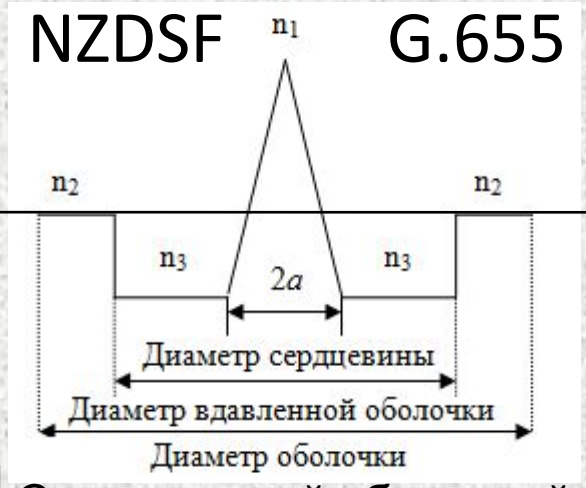
n=1,4585

С выровненной оболочкой С вдавленной оболочкой

Оптические волокна со смещенной дисперсией

DSF G.653

NZDSF G.655



n=1,4585

С выровненной оболочкой С вдавленной оболочкой

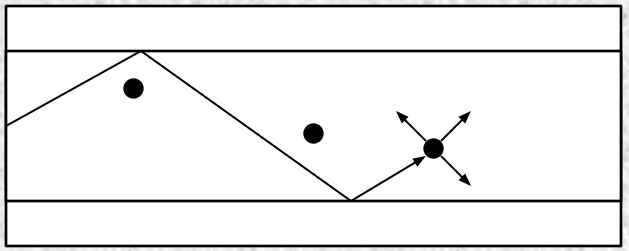
Затухание в волоконных световодах

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_к + \alpha_{пр} + \alpha_{ик}$$

$$\alpha_c = \alpha_n + \alpha_p$$

$$\alpha_n = \frac{\pi n_1}{\lambda} tg\delta$$

$$\alpha_p = \frac{C}{\lambda^4} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4}\left(n_1^2 - 1\right)KT\chi$$



$$\alpha_{ик} = Ce^{-\frac{k}{\lambda}}$$

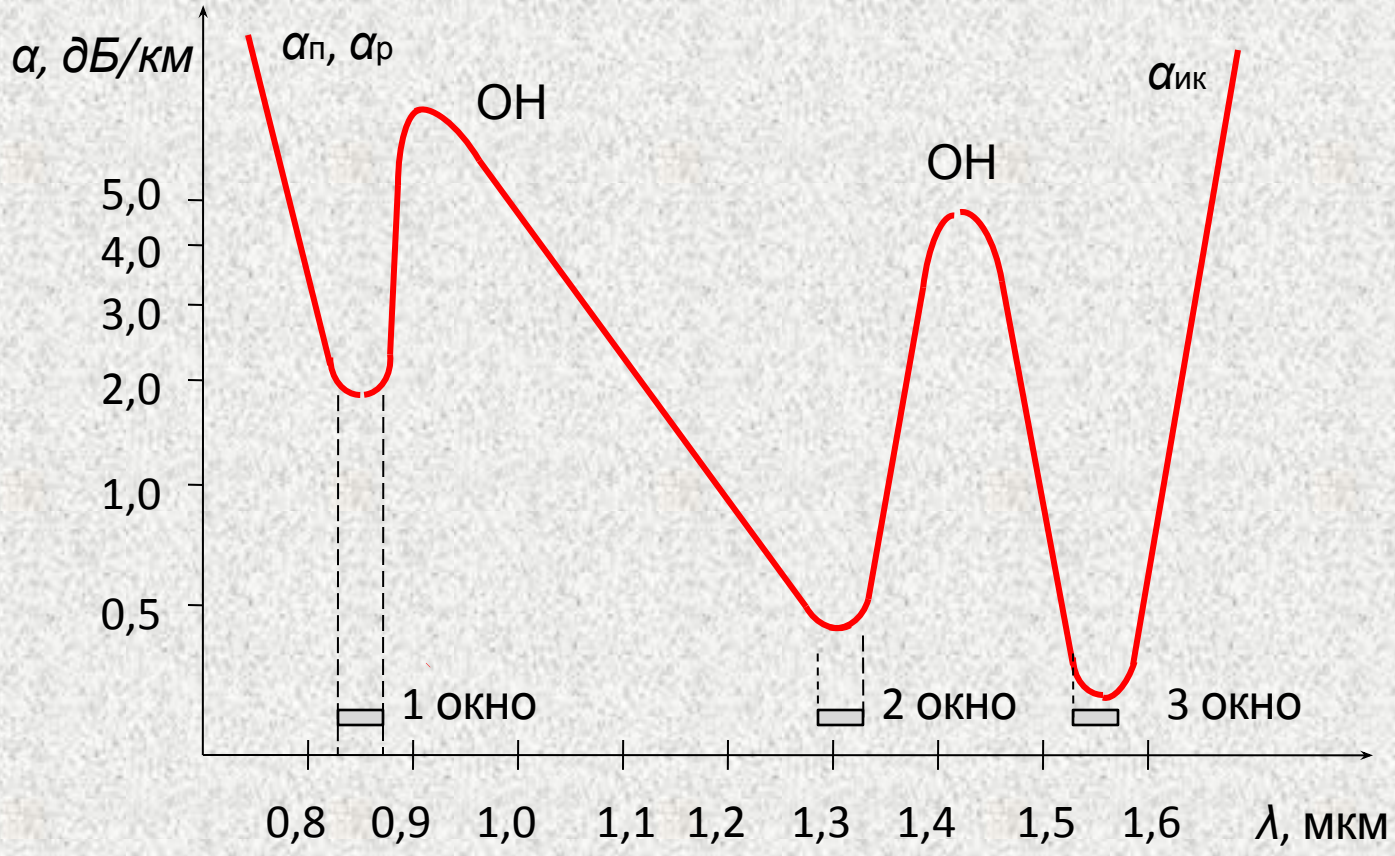
$$\Delta\lambda = 0{,}8 \div 1{,}6 \quad мкм$$

Для кварцевого стекла С=0,9; *k*=(0,7-0,9) мкм.

Коэффициент затухания $\alpha_{пр}$ связан с наличием в оптическом волокне посторонних примесей, приводящих к дополнительному поглощению оптической мощности.

На длине волны 2,73 мкм вследствие теплового движения в этой группе атомов водорода и кислорода возникают резонансные явления, которые вызывают максимальное поглощение в стекловолокне.

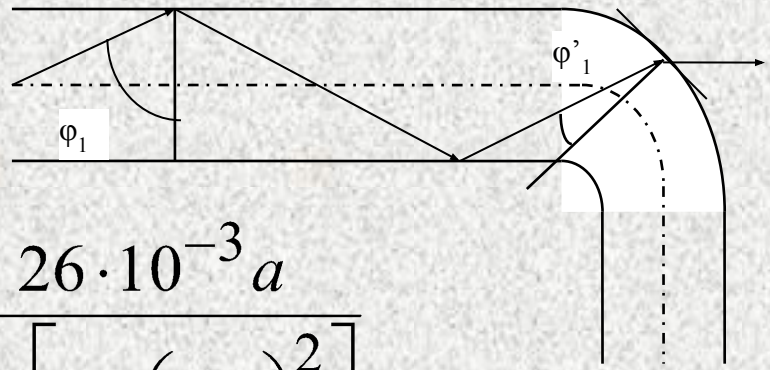
И если указанный пик поглощения находится вне рабочего диапазона длин волн кварцевого стекловолокна, то сопутствующие гармоники оказывают непосредственное воздействие на волокна в диапазоне длин волн от 0,8 до 1,6 мкм, и вызывают два пика поглощения (0,9 и 1,4 мкм).



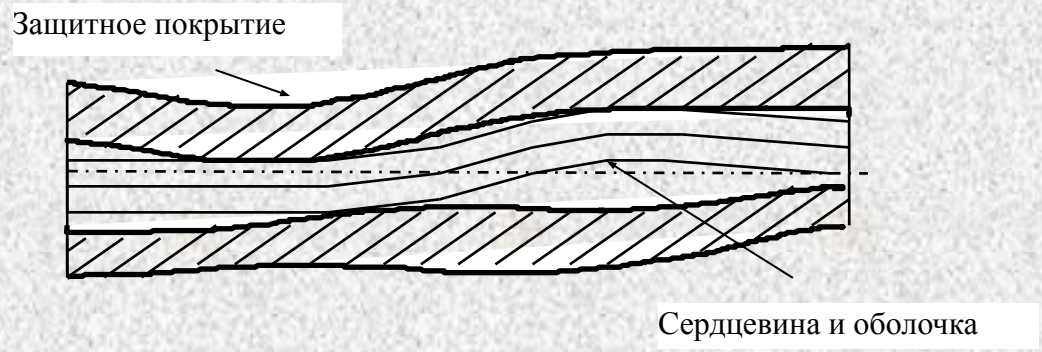
1 окно λ=0,85 мкм, α=1,8 дБ/км, $L_р$=30 км

2 окно λ=1,31 мкм, α=0,36 дБ/км, $L_р$=80 км

3 окно λ=1,55 мкм, α=0,22 дБ/км, $L_р$=150 км



$$\alpha_{macro} = \frac{26 \cdot 10^{-3} a}{\Delta d \left[1 + \left(\frac{s}{\pi d} \right)^2 \right]}$$

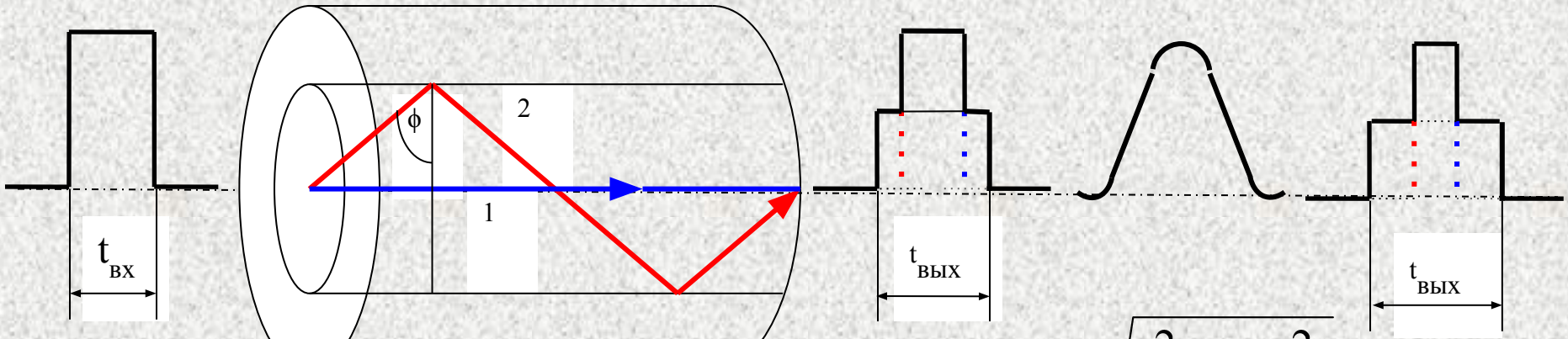


$$\alpha_{microм} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{k a^4}{b^6 \Delta^3}$$

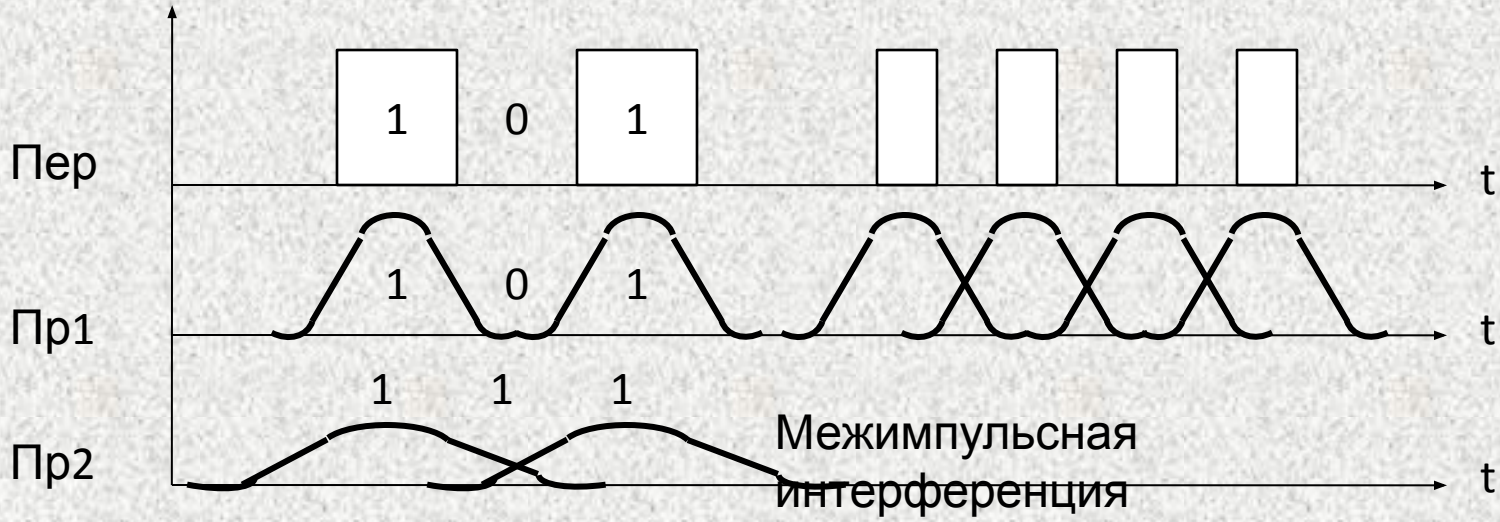
$$\alpha_{microo} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{k a^4}{b^6 \Delta^3} \cdot \frac{\omega_0^6}{\lambda^4}$$

Дисперсия в волоконных световодах.

Дисперсия представляет собой рассеяние во времени спектральных и модовых составляющих оптического сигнала.



$$\tau = \sqrt{t_{вых}^2 - t_{вх}^2}$$



Различают следующие виды дисперсии:

Модовую

Хроматическую: Материальную, n=ϕ(λ)

Волноводную, β=ϕ(ω)

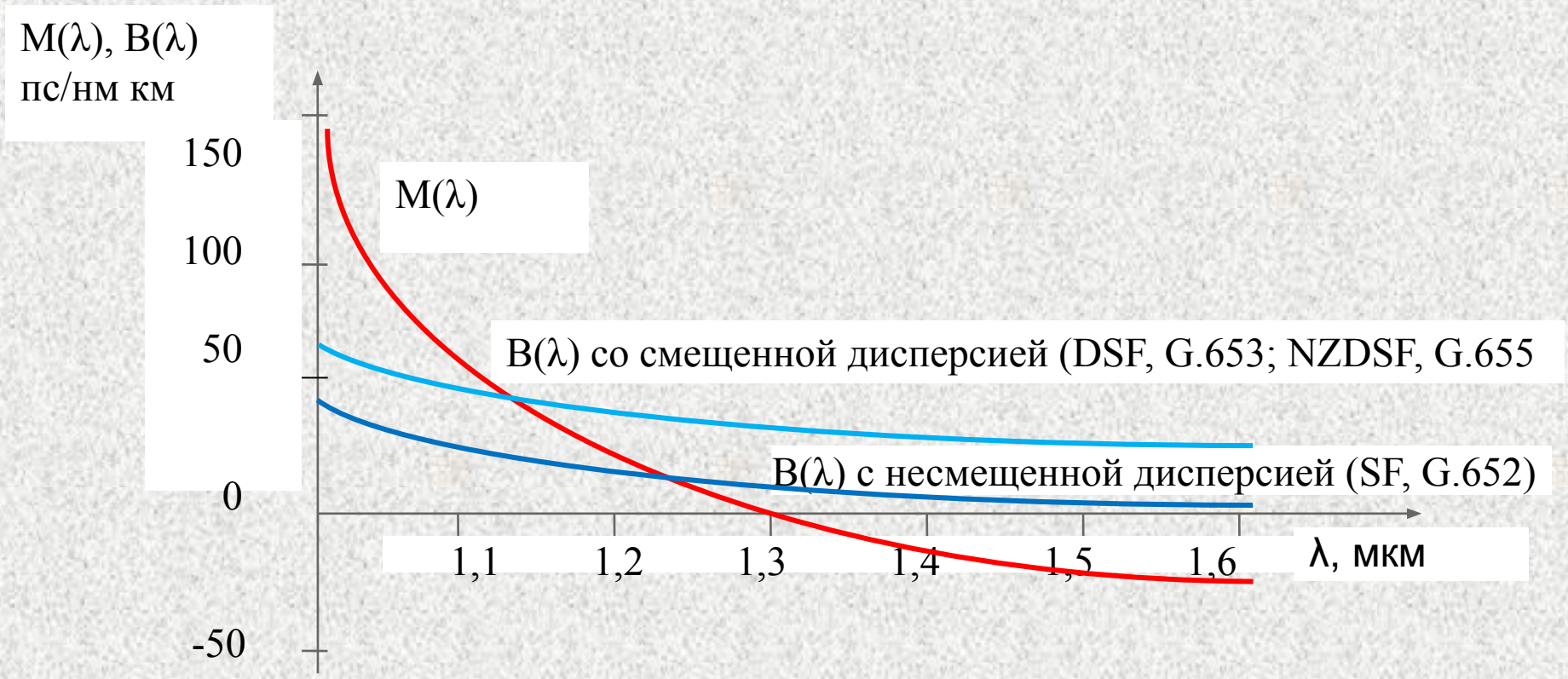
$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_{мод}^2 + (\tau_в + \tau_м)^2}$$

$$\tau_{мод} = \frac{(NA)^2 l}{2n_1 c}$$

$$\tau_м = \Delta\lambda M(\lambda) l$$

$$\tau_в = \Delta\lambda B(\lambda) l$$

$$\tau = |\tau_м + \tau_в|$$



λ=1,31 мкм, SF, G.652

λ=1,55 мкм, DSF, G.653

DWDM, NZDSF, G.655

Определение длины регенерационного участка. По затуханию

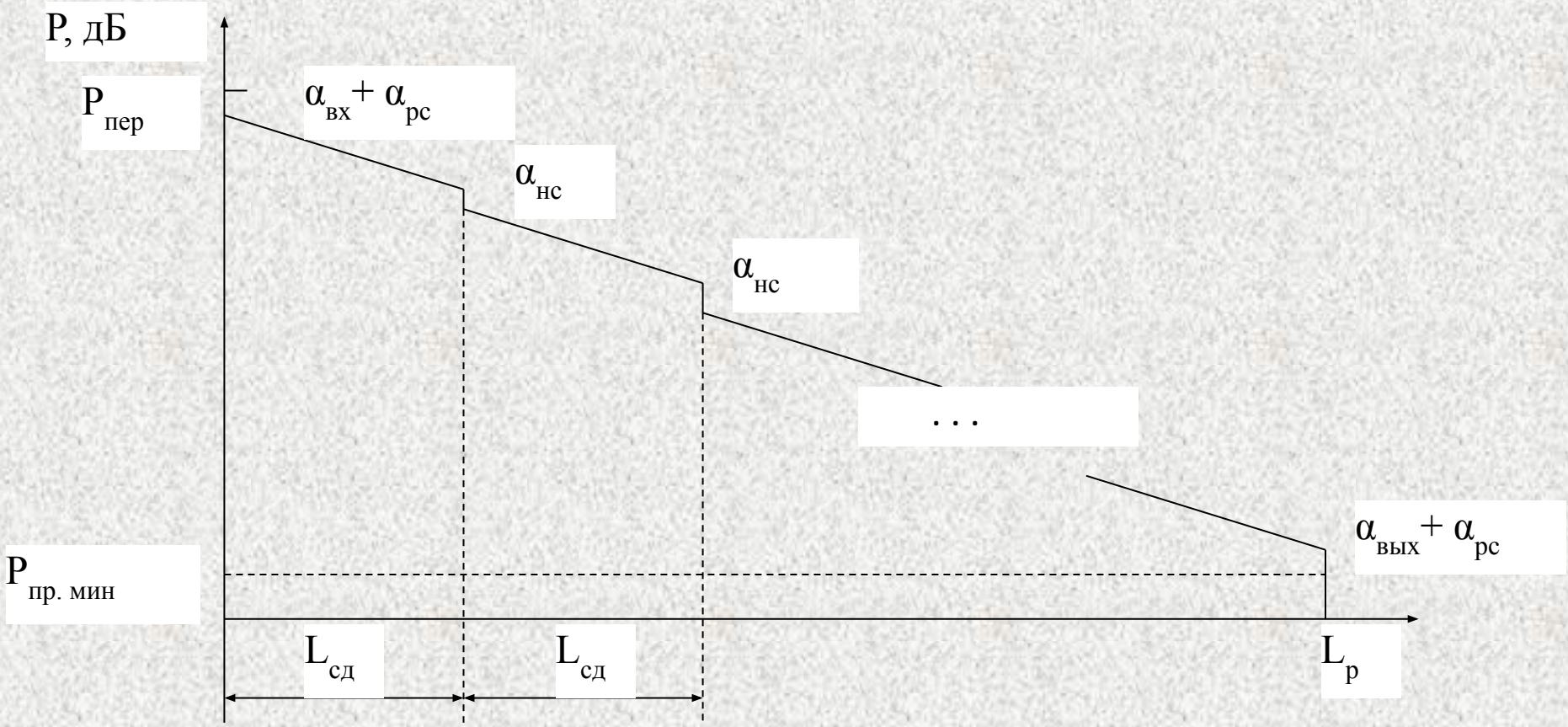


рис. 4

$$P_{пер} - P_{пр.мин} - \alpha_{вх} - 2\alpha_{рс} - \left(\frac{L_р}{L_{сд}} - 1\right)\alpha_{нс} - \alpha L_р - \alpha_{вых} = 0$$

$$П = P_{пер} - \alpha_{вх} - \alpha_{вых} - P_{пр.мин}$$

$$L_p \le \frac{П - 2\alpha_{рс} + \alpha_{нс}}{\alpha_{нс} + \alpha L_{сд}} L_{сд}$$

По дисперсии $$L_p \le \frac{0,25}{B\tau}$$

$$L_p \le \frac{36 - 2 \cdot 0,3 + 0,02}{0,02 + 0,22 \cdot 4} 4 = 157$$

$$L_p \le \frac{0,25 \cdot 10^6}{622 \cdot 3,2} = 125$$

Магистральные волоконно-оптические кабели.

ОКМС-А-4/2(2,4)Сп-12(2)/4(5)

Внешняя полиэтиленовая оболочка

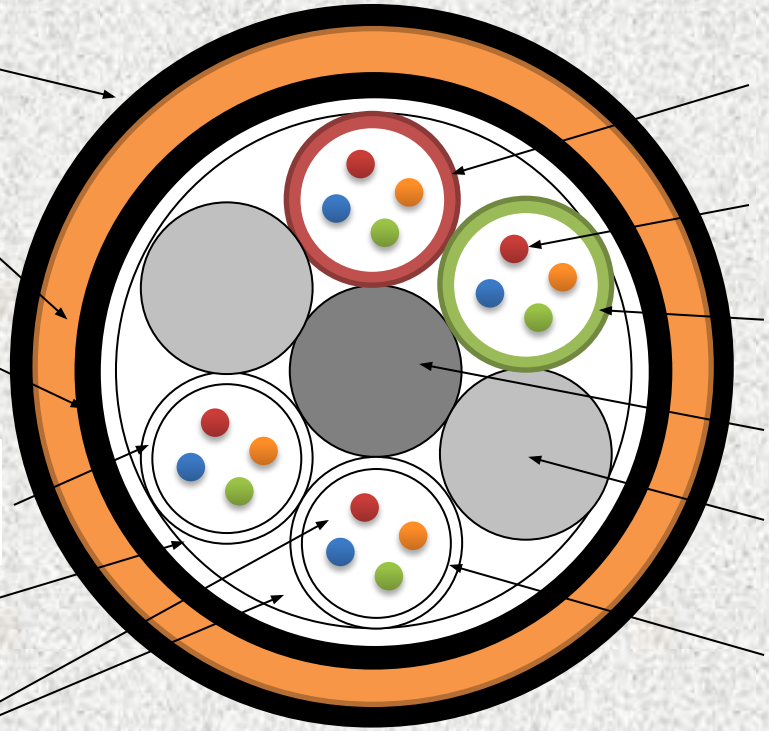
Арамидные нити

Внутренняя полиэтиленовая оболочка

Оптический модуль № 4 SF (G.652)

Связывающие ленты

Гидрофобный заполнитель



Оптический модуль № 1 NZDSF (G.655)

Оптические волокна

Оптический модуль № 2 SF (G.652)

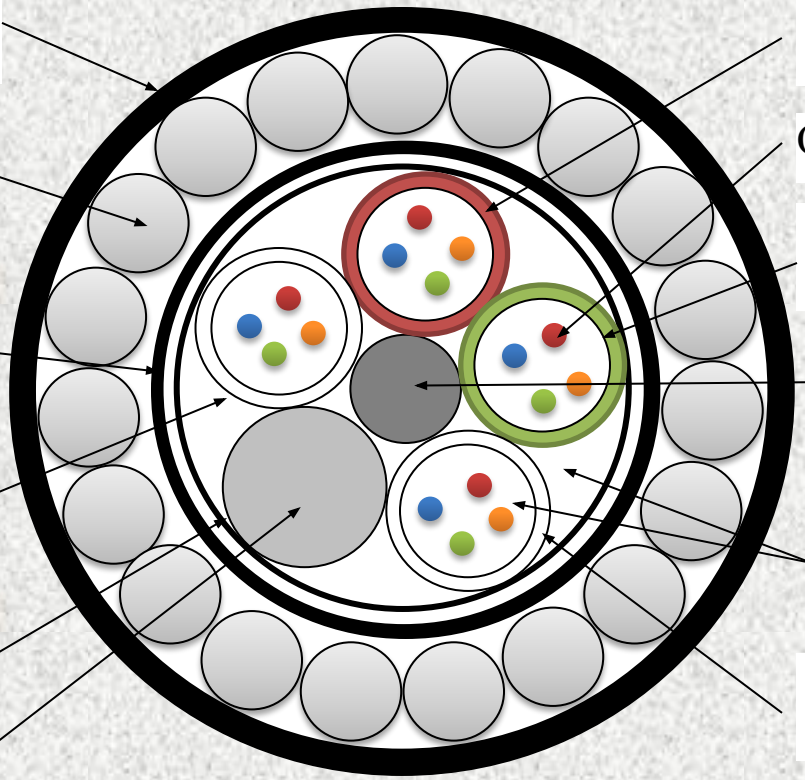
Стеклопластиковый пруток

Заполняющий модуль

Оптический модуль № 3 SF (G.652)

Конструкция волоконно-оптического кабеля ОКМС-А-4/2(2,4)Сп-12(2)/4(5)

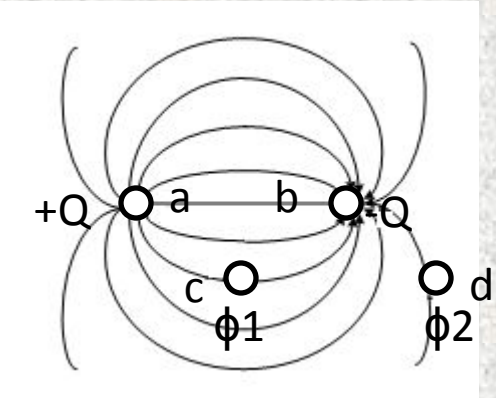
ДАУ-012Е04/004Н04-05



Конструкция волоконно-оптического кабеля ДАУ 012Е04/004Н04-05

Природа взаимного влияния между цепями связи. Первичные параметры влияния

1. Электрическое влияние.



Электрическое влияние характеризуется коэффициентом электрической связи, который представляет собой отношение тока, наведенного в цепи подверженной влиянию, к разности потенциалов во влияющей цепи:

$$K_{12} = \frac{I_2}{U_1}, \text{См}$$

Коэффициент электрической связи через составляющие параметры выражается следующим образом:

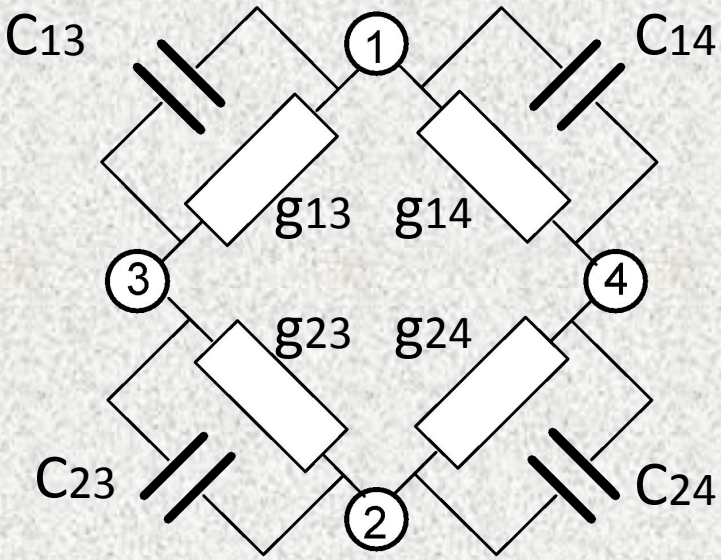
$$K_{12} = g + j\omega k,$$

где g – активная составляющая электрической связи, обусловленная асимметрией потерь энергии в изоляции на диэлектрическую поляризацию;

$$g = (g_{13} + g_{24}) - (g_{14} + g_{23})$$

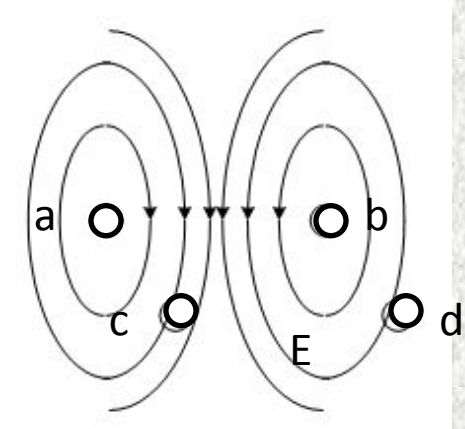
k – емкостная связь, обусловленная асимметрией частичных емкостей.

$$k = (C_{13} + C_{24}) - (C_{14} + C_{23})$$



Эквивалентная схема электрического влияния

2. Магнитное влияние.



Магнитное влияние характеризуется коэффициентом магнитной связи, который представляет собой отношение ЭДС, наведенной в цепи подверженной влиянию, к току во влияющей цепи с обратным знаком:

$$M_{12} = -\frac{E_2}{I_1}, \text{Ом}$$

Коэффициент магнитной связи через параметры эквивалентной схемы выражается следующим образом:

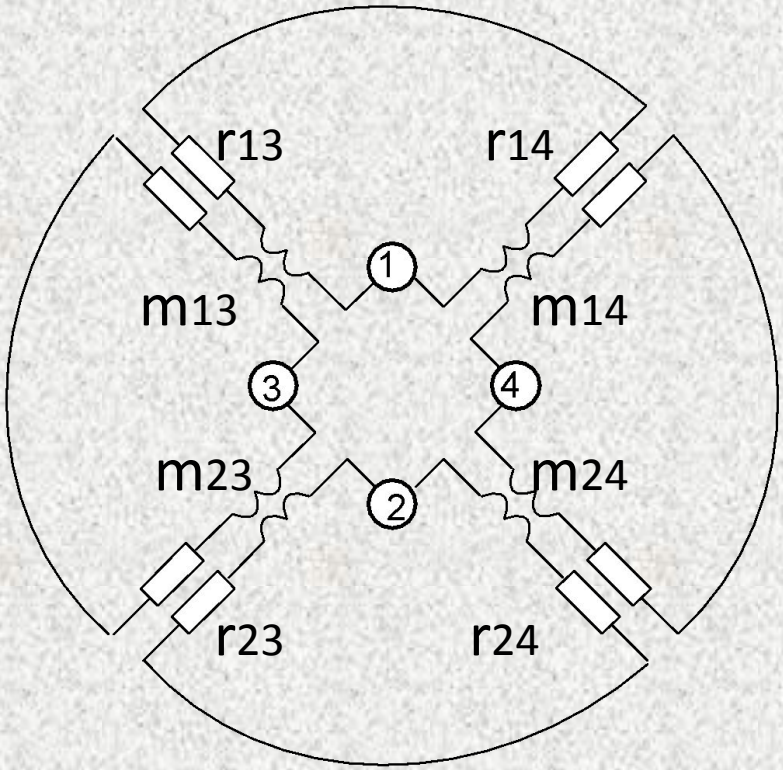
$$M_{12} = r + j\omega m,$$

где r – активная составляющая магнитной связи, обусловленная асимметрией потерь энергии в проводниках на вихревые токи;

$$r = (r_{13} + r_{24}) - (r_{14} + r_{23})$$

m – индуктивная связь, обусловленная асимметрией частичных индуктивностей.

$$m = (m_{13} + m_{24}) - (m_{14} + m_{23})$$



Эквивалентная схема магнитного влияния

Параметры g, k, r, m называются первичными параметрами влияния.

Электрическая связь имеет единицы размерности См, а магнитная связь – Ом,

Соответствующие коэффициенты при оценке совместного электромагнитного влияния могут быть представлены в безразмерных единицах следующим образом:

$$K_{12} = (g + j\omega k)\sqrt{Z_{в1} Z_{в2}}$$

$$M_{12} = \frac{r + j\omega m}{\sqrt{Z_{в1} Z_{в2}}},$$

где $Z_{в1}, Z_{в2}$ - волновые сопротивления соответственно влияющей цепи и цепи, подверженной влиянию.

2. Переходное затухание и защищенность.

Вторичным параметром взаимного влияния является переходное затухание, которое характеризует ***затухание*** токов влияния при ***переходе*** с одной цепи на другую.

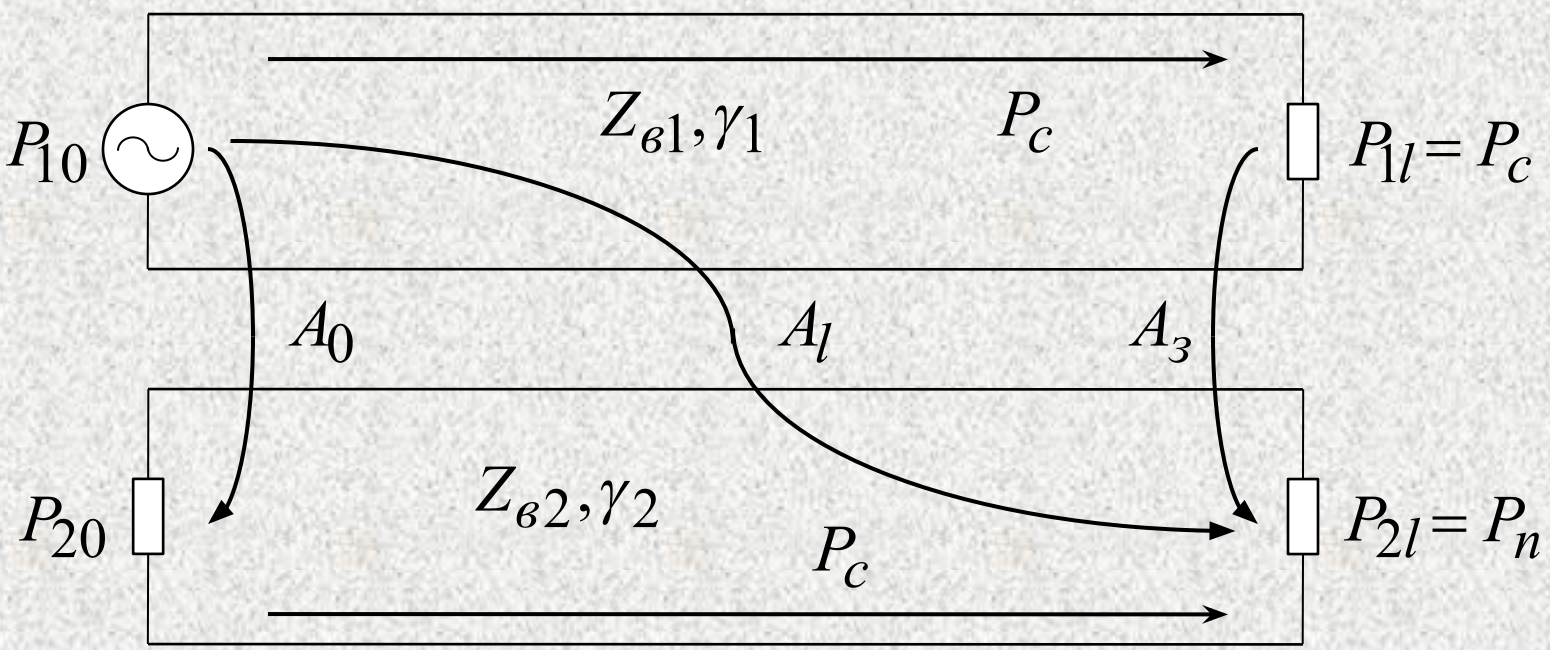
Величина переходного затухания должна принимать возможно большие значения, в то время как значение собственного затухания цепи должно стремиться к нулю.

В математическом смысле переходное затухание представляет собой логарифм отношения мощности генератора во влияющей цепи к мощности помехи в цепи, подверженной влиянию

$$A = 10\lg\left|\frac{P_1}{P_2}\right|, \text{дБ}.$$

Различают два возможных перехода энергии: на ближний и на дальний конец линии, подверженной влиянию.

I цепь – влияющая линия



II цепь – линия, подверженная влиянию

Переход энергии на тот конец цепи, где расположен генератор влияющей цепи, определяет собой переходное затухание на ближнем конце

$$A_0 = 10\lg\left|\frac{P_{10}}{P_{20}}\right| = 10\lg\left|\frac{I_{10}^2 \cdot Z_{в1}}{I_{20}^2 \cdot Z_{в2}}\right| = 20\lg\left|\frac{I_{10}}{I_{20}}\sqrt{\frac{Z_{в1}}{Z_{в2}}}\right|$$

Переход энергии на противоположный конец второй цепи определяет собой переходное затухание на дальнем конце

$$A_l = 10\lg\left|\frac{P_{10}}{P_{2l}}\right| = 10\lg\left|\frac{I_{10}^2 \cdot Z_{в1}}{I_{2l}^2 \cdot Z_{в2}}\right| = 20\lg\left|\frac{I_{10}}{I_{2l}}\sqrt{\frac{Z_{в1}}{Z_{в2}}}\right|$$

Приведенные параметры не учитывают соотношение полезного сигнала и помехи, и, следовательно, не могут быть использованы для оценки качества связи.

В электросвязи активно применяется параметр защищенность цепей, который представляет собой разность между уровнями полезного сигнала ($p_с$) и помехи ($p_п$) в рассматриваемой точке цепи

$$A_з = p_с - p_п.$$

Через мощности защищенность цепей рассчитывается по формуле:

$$A_з = 10 \lg \left| \frac{P_с}{P_п} \right|,$$

где $P_с$ – мощность полезного сигнала, распространяющегося от начала к концу второй цепи;

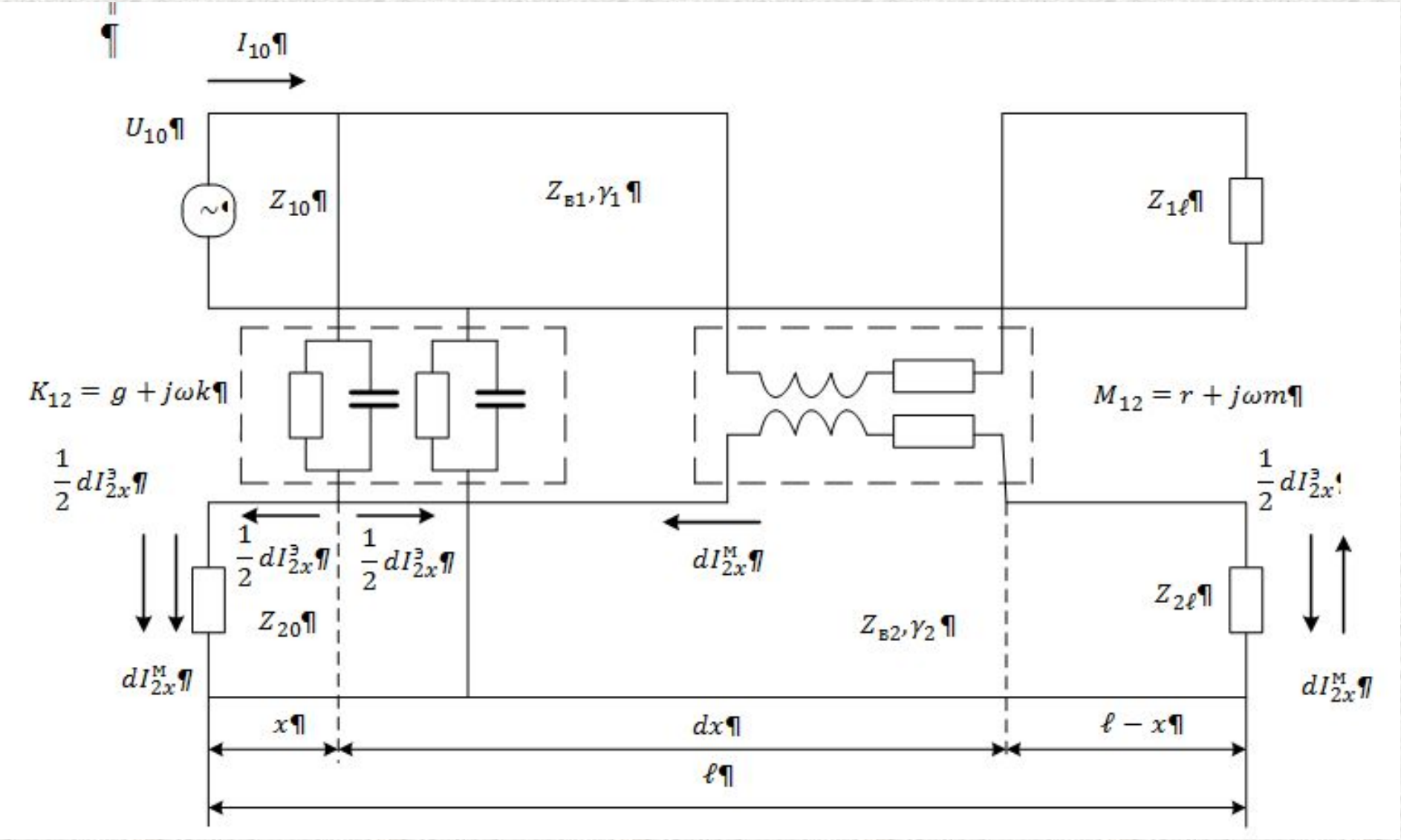
$P_п$ – мощность помехи, поступающей с первой на конец второй цепи.

Для цепей, обладающих одинаковыми параметрами, $(Z_{в1} = Z_{в2}, \quad \gamma_1 = \gamma_2)$ защищенность цепей определится

$$A_з = 10\lg\left|\frac{P_{1l}}{P_{2l}}\right| = 10\lg\left|\frac{P_{1l} \cdot P_{10}}{P_{2l} \cdot P_{10}}\right| = 10\lg\left|\frac{P_{10}}{P_{2l}}\right| + 10\lg\left|\frac{P_{1l}}{P_{10}}\right| = A_l - \alpha \cdot l$$

Таким образом, защищенность цепей представляет собой разность между переходным затуханием на дальнем конце и собственным затуханием линии.

Основное уравнение влияния между цепями.



Переходное затухание на ближнем конце рассчитывается по формуле

$$A_0 = 20\lg\left|\frac{I_{10}}{I_{20}}\sqrt{\frac{Z_{в1}}{Z_{в2}}}\right| =$$

$$= 20\lg\left|\frac{2(\gamma_1+\gamma_2)I_{10}}{I_{10}\left(K_{12}Z_{в1}+\frac{M_{12}}{Z_{в2}}\right)[1-e^{-(\gamma_1+\gamma_2)\ell}]}\sqrt{\frac{Z_{в1}}{Z_{в2}}}\right| =$$

$$\left(K_{12}Z_{в1}+\frac{M_{12}}{Z_{в2}}\right)\sqrt{\frac{Z_{в2}}{Z_{в1}}} = K_{12}\sqrt{Z_{в1}Z_{в2}}+\frac{M_{12}}{\sqrt{Z_{в1}Z_{в2}}} = N_{12}$$

где N_{12} – электромагнитная связь на ближнем конце.

Тогда

$$A_0 = 20\lg\left|\frac{2(\gamma_1+\gamma_2)}{N_{12}[1-e^{-(\gamma_1+\gamma_2)\ell}]}\right|$$

Переходное затухание на дальнем конце рассчитывается по формуле

$$A_\ell = 20\lg\left|\frac{I_{10}}{I_{2\ell}}\sqrt{\frac{Z_{в1}}{Z_{в2}}}\right| =$$

$$= 20\lg\left|\frac{2(\gamma_1-\gamma_2)I_{10}e^{\gamma_2\ell}}{I_{10}\left(K_{12}Z_{в1}-\frac{M_{12}}{Z_{в2}}\right)[1-e^{-(\gamma_1-\gamma_2)\ell}]}\sqrt{\frac{Z_{в1}}{Z_{в2}}}\right|$$

$$\left(K_{12}Z_{в1}-\frac{M_{12}}{Z_{в2}}\right)\sqrt{\frac{Z_{в2}}{Z_{в1}}} = K_{12}\sqrt{Z_{в1}Z_{в2}}-\frac{M_{12}}{\sqrt{Z_{в1}Z_{в2}}} = F_{12}$$

где F_{12} – электромагнитная связь на дальнем конце.

Тогда

$$A_\ell = 20\lg\left|\frac{2(\gamma_1-\gamma_2)e^{\gamma_2\ell}}{F_{12}[1-e^{-(\gamma_1-\gamma_2)\ell}]}\right|$$

Для цепей, обладающих одинаковыми параметрами

$(Z_{в1} = Z_{в2} = Z_в, \quad \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma)$,

переходное затухание на ближнем конце рассчитывается по формуле

$$A_0 = 20\lg\left|\frac{4\gamma}{N_{12}(1 - e^{-2\gamma\ell})}\right|.$$

Здесь $N_{12} = K_{12} Z_в + \frac{M_{12}}{Z_в}$

Для дальнего конца при условии $\gamma_1 - \gamma_2 \to 0$ возникает неопределенность $\frac{0}{0}$. В соответствии с теоремой Лопиталя, если $\gamma_1 - \gamma_2 \to 0$, то отношение $\frac{(\gamma_1 - \gamma_2)}{[1 - e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)\ell}]} \to \frac{1}{\ell}$.

Тогда

$$A_\ell = 20\lg\left|\frac{2e^{\gamma\ell}}{F_{12}\ell}\right|.$$

Здесь $F_{12} = K_{12} Z_в - \frac{M_{12}}{Z_в}$

Для определения защищенности цепей воспользуемся последним выражением, полагая, что логарифм произведения равен сумме двух логарифмов.

$$A_\ell = 20\lg\left|\frac{2}{F_{12}\ell}\right| + 20\lg\left|e^{\gamma\ell}\right| = 20\lg\left|\frac{2}{F_{12}\ell}\right| + \alpha\ell\,.$$

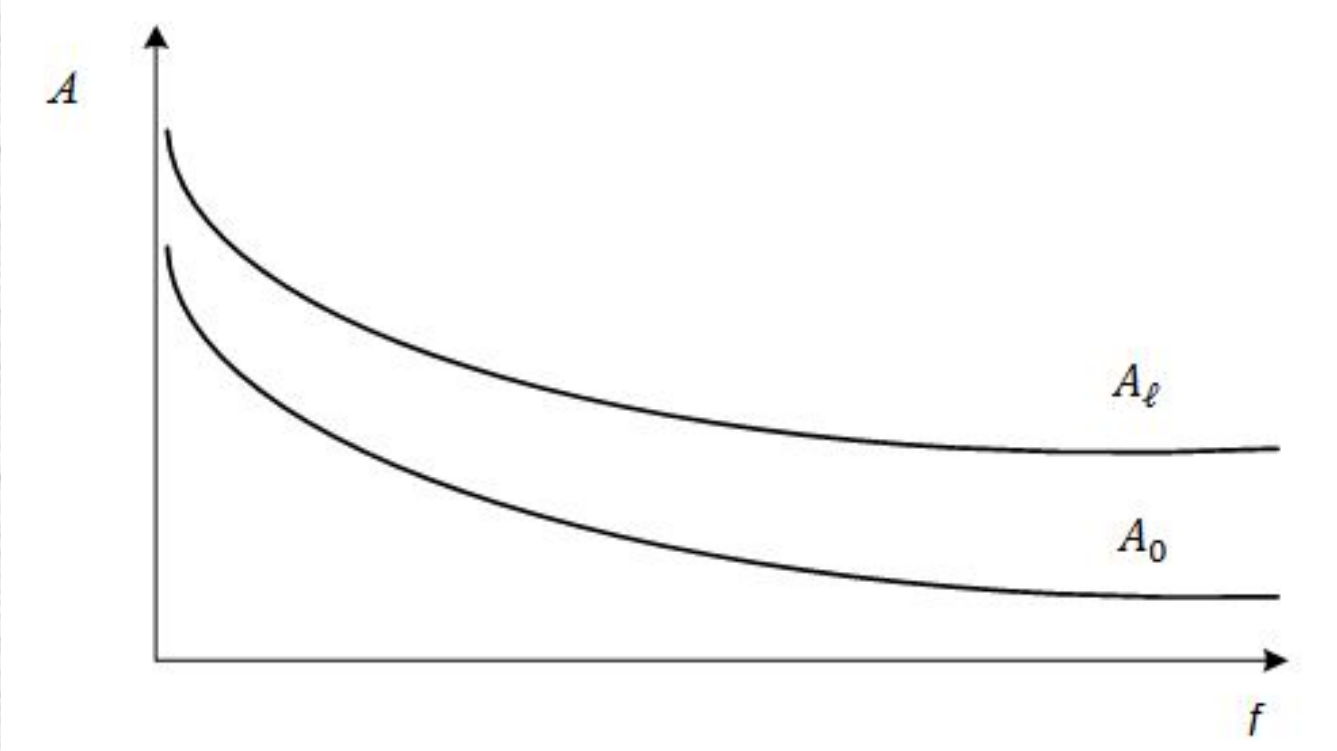
Учитывая, что $A_\ell = A_з + \alpha\ell$, защищенность цепей рассчитывается по формуле

$$A_з = 20\lg\left|\frac{2}{F_{12}\ell}\right|$$

Зависимость переходного затухания от частоты тока и длины линии.

1. Зависимость переходного затухания от частоты.

С увеличением частоты взаимное влияние между цепями возрастает, а переходное затухание и защищенность соответственно уменьшаются.

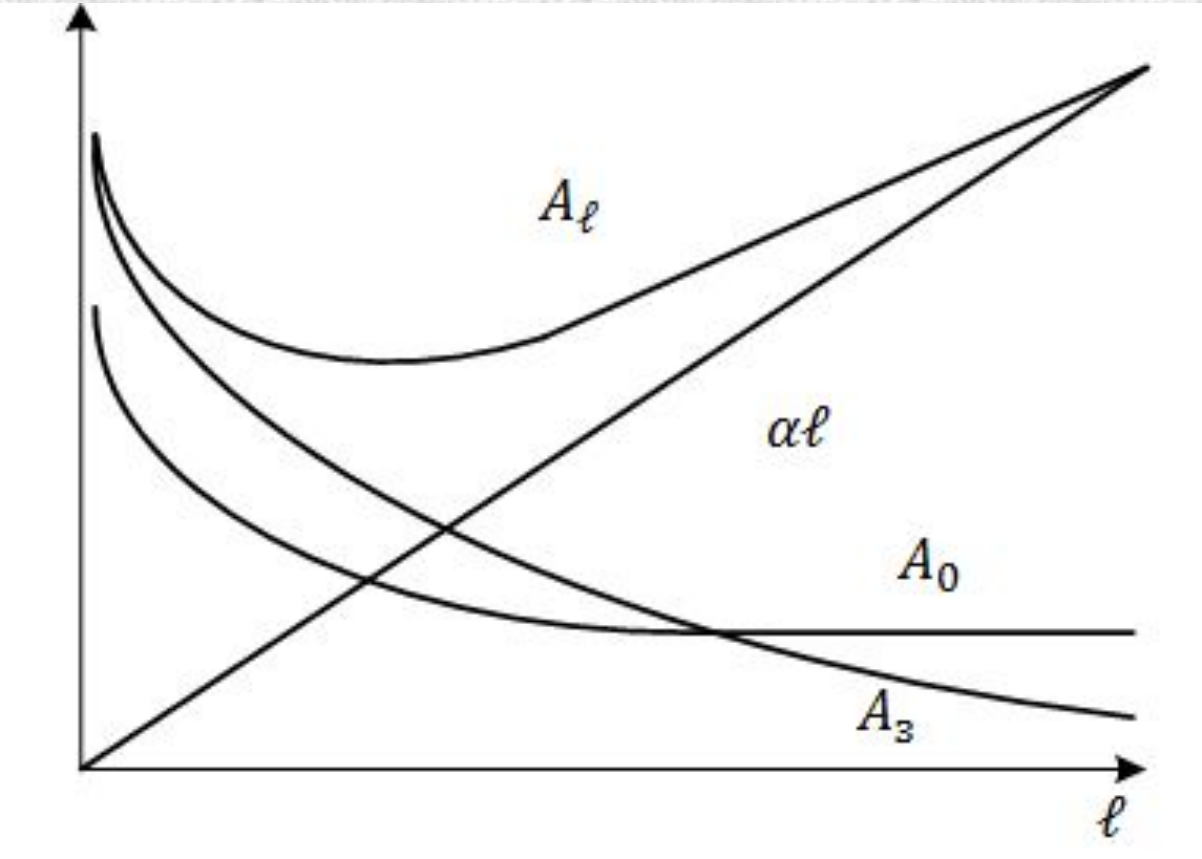


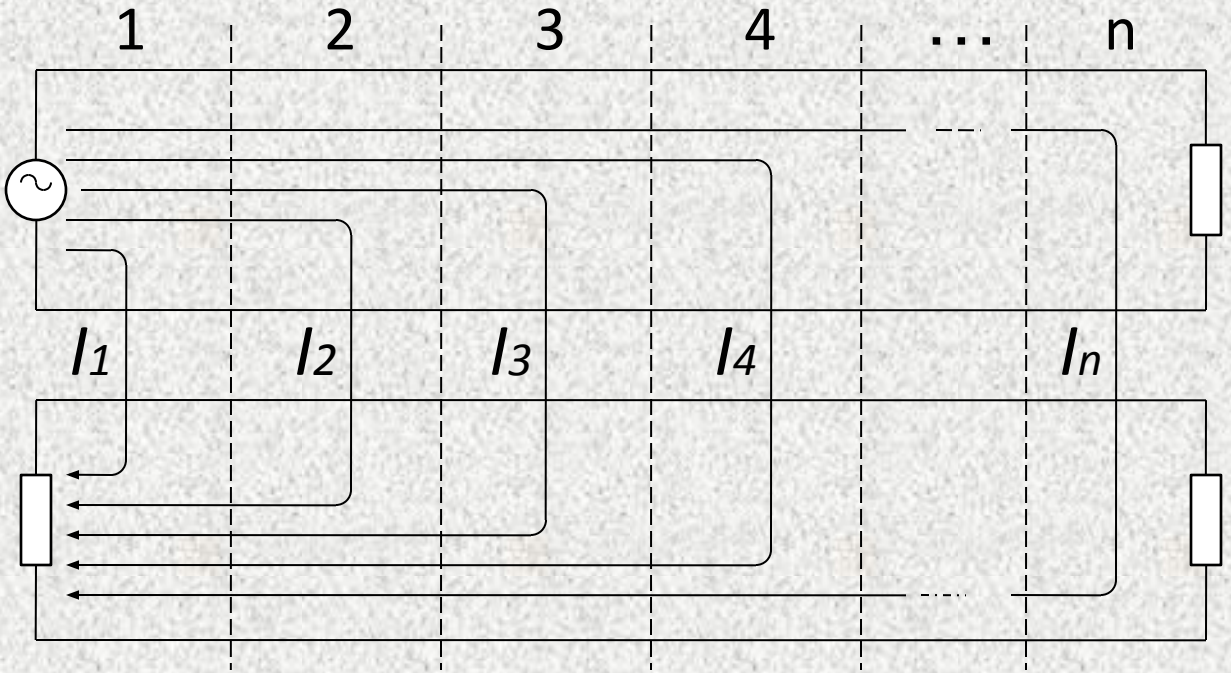
$$A_0 = 20\lg\left|\frac{4\gamma}{N_{12}(1-e^{-2\gamma\ell})}\right|, A_\ell = 20\lg\left|\frac{2e^{\gamma\ell}}{F_{12}\ell}\right|,$$

где $N_{12} = K_{12}Z_в + \frac{M_{12}}{Z_в}$ $F_{12} = K_{12}Z_в - \frac{M_{12}}{Z_в}$

$$K_{12} = g + j\omega k, M_{12} = r + j\omega m.$$

2. Зависимость переходного затухания от длины линии.





$I_1 > I_2 > I_3 > I_4 > \cdots > I_n$

Переходное затухание на ближнем конце вначале уменьшается, а затем стабилизируется.

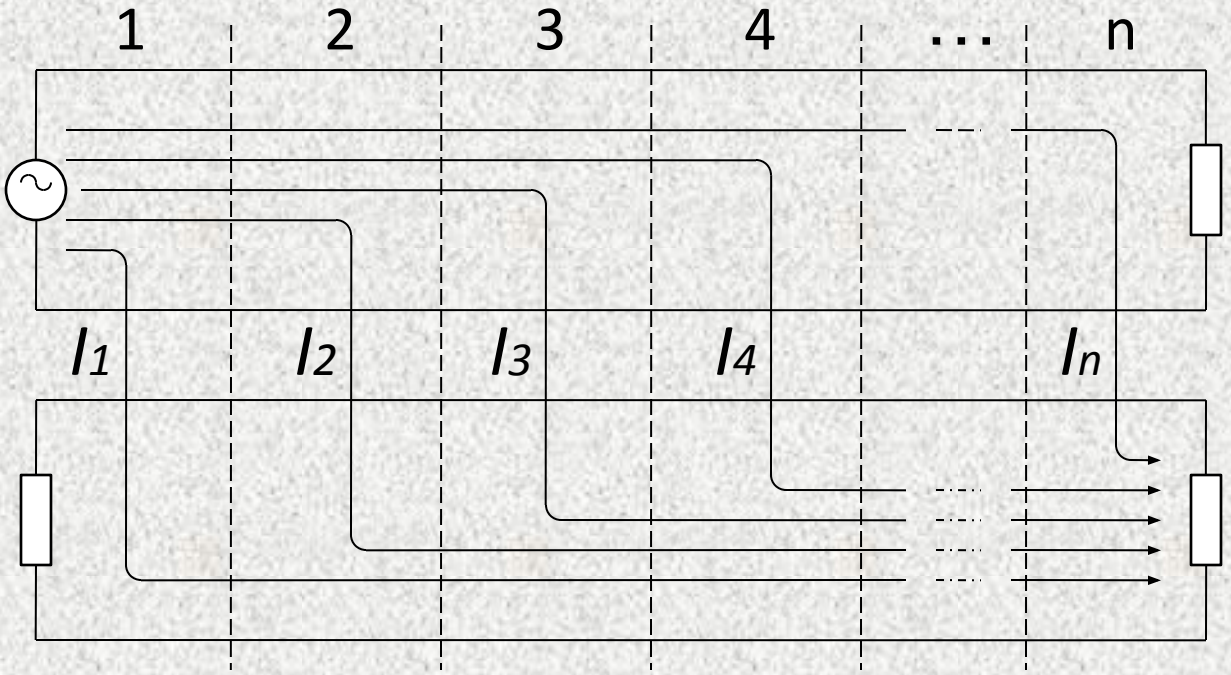
Это объясняется тем, что, начиная с определенной длины, токи помех с отдаленных участков приходят настолько слабыми ($I_1 > I_2 > I_3 > \cdots > I_n$) что фактически не изменяют взаимное влияние между цепями, и переходное затухание остается величиной постоянной.

Действительно, если линия короткая ($2\gamma\ell < 4{,}3$ дБ), то $\left(1 - e^{-2\gamma\ell}\right) \to 2\gamma\ell$, тогда $A_0 = 20\lg\left|\frac{2}{N_{12}\ell}\right|$ и с увеличением длины переходное затухание на ближнем конце уменьшается.

Если линия длинная ($2\gamma\ell > 13$ дБ), то $\left(1 - e^{-2\gamma\ell}\right) \to 1$, тогда $A_0 = 20\lg\left|\frac{4\gamma}{N_{12}}\right|$, переходное затухание не зависит от длины линии и остается величиной постоянной.

Защищенность цепей неуклонно уменьшается, так как с увеличением длины линии увеличивается количество участков, с которых поступают равные величи $I_1 = I_2 = I_3 = \cdots = I_n$).

Взаимное влияние между цепями возрастает, а защищенность становится меньше.



$$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = \cdots = l_n$$

Такое поведение защищенности цепей подтверждается и расчетной формулой, в которой длина линии находится в знаменателе, и увеличение последней неуклонно приводит к уменьшению защищенности

$$A_з = 20\lg\left|\frac{2}{F_{12}\ell}\right|.$$

Переходное затухание на дальнем конце вначале уменьшается, а затем возрастает.

Переходное затухание на дальнем конце численно равно сумме защищенности и собственного затухания цепи. $A_\ell = A_з + \alpha\ell$

До определенной длины линии защищенность преобладает над собственным затуханием, и, поэтому переходное затухание носит падающий характер.

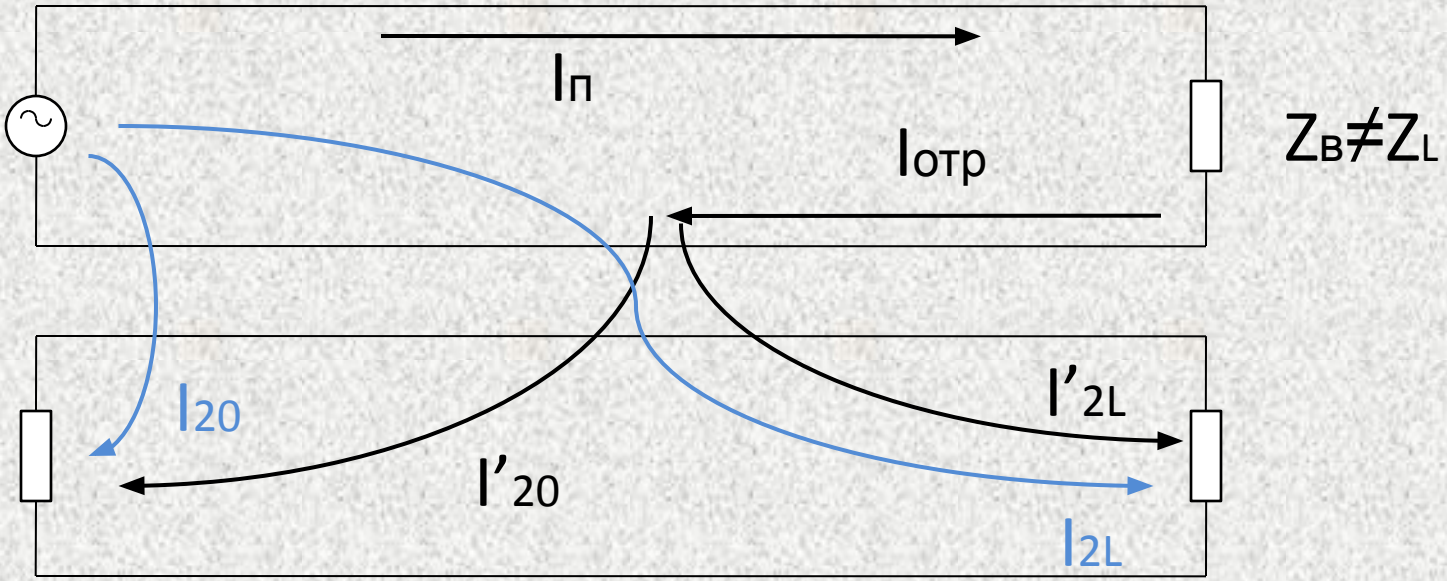
Начиная с определенной длины линии, собственное затухание становится больше защищенности, и переходное затухание на дальнем конце возрастает.

Косвенные влияния.

1. Влияния за счет отражений при несогласованных нагрузках.

При несогласованных нагрузках $Z_в \neq Z_\ell$

только часть передаваемой энергии поступает в приемник.



Дополнительное влияние за счет отражений при несогласованных нагрузках характеризуется коэффициентом отражения

$$p = \left|\frac{Z_в - Z_\ell}{Z_в + Z_\ell}\right|.$$

Для высокочастотных цепей коэффициент отражения четко нормируется

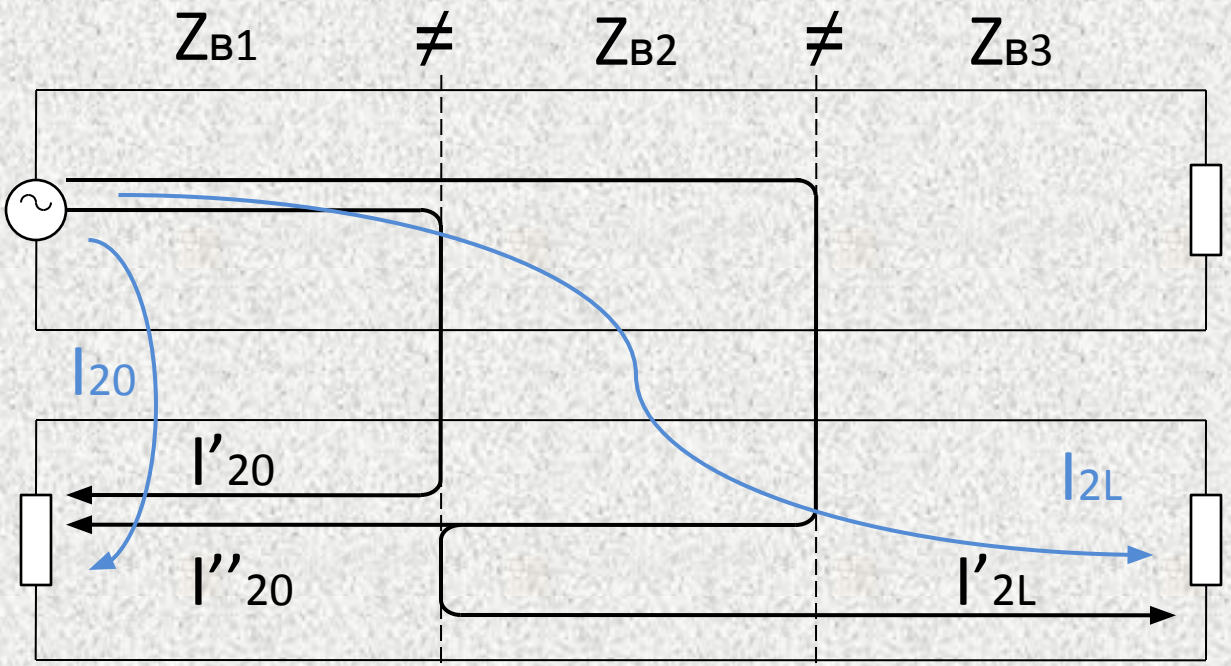
$$p \le \frac{1{,}25}{\sqrt{f}}$$

где f – частота, кГц.

2. Влияние из-за конструктивных неоднородностей.

Линия связи на всем своем протяжении может отличаться по конструкции.

В местах неоднородностей появляются встречные и попутные потоки энергии, которые поступают на ближний и дальней концы второй цепи, что проявляется в виде дополнительного влияния



Конструктивные неоднородности строго нормируются.

Асимметрия сопротивлений жил должна находиться в следующих пределах

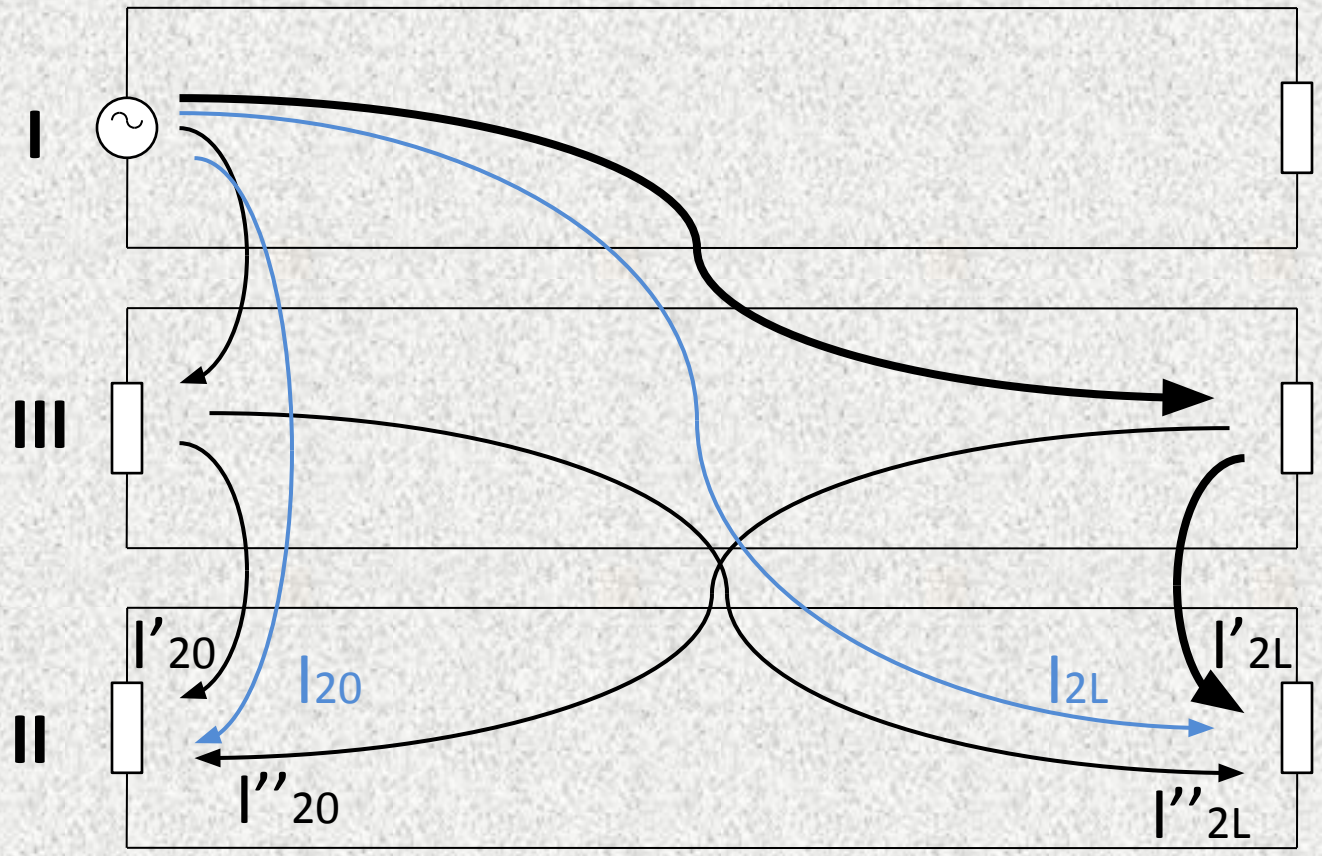
$$\Delta R = 0{,}1 \div 0{,}14, \text{Ом/км}.$$

Емкостная асимметрия - $\Delta C = 1{,}0 \div 1{,}2 \text{ нФ/км}.$

Волновое сопротивление не должно отличаться от среднего своего значения не более, чем на 3 – 5%/

3. Влияние из-за наличия соседних третьих цепей.

Косвенное влияние из-за наличия соседних третьих цепей происходит в два этапа



Симметрирование кабельных цепей

Симметрированием называется комплекс мероприятий, проводимый в процессе монтажа симметричного кабеля с целью уменьшения взаимного влияния между цепями и уменьшения влияния внешних электромагнитных полей на цепи, расположенные в кабеле.

Существуют три метода симметрирования:

- метод скрещивания;
- конденсаторный метод;
- концентрированное симметрирование.

При симметрировании низкочастотных цепей применяются метод скрещивания и конденсаторный метод.

При симметрировании высокочастотных цепей используются метод скрещивания и концентрированное симметрирование.

1. Емкостные связи и асимметрии.

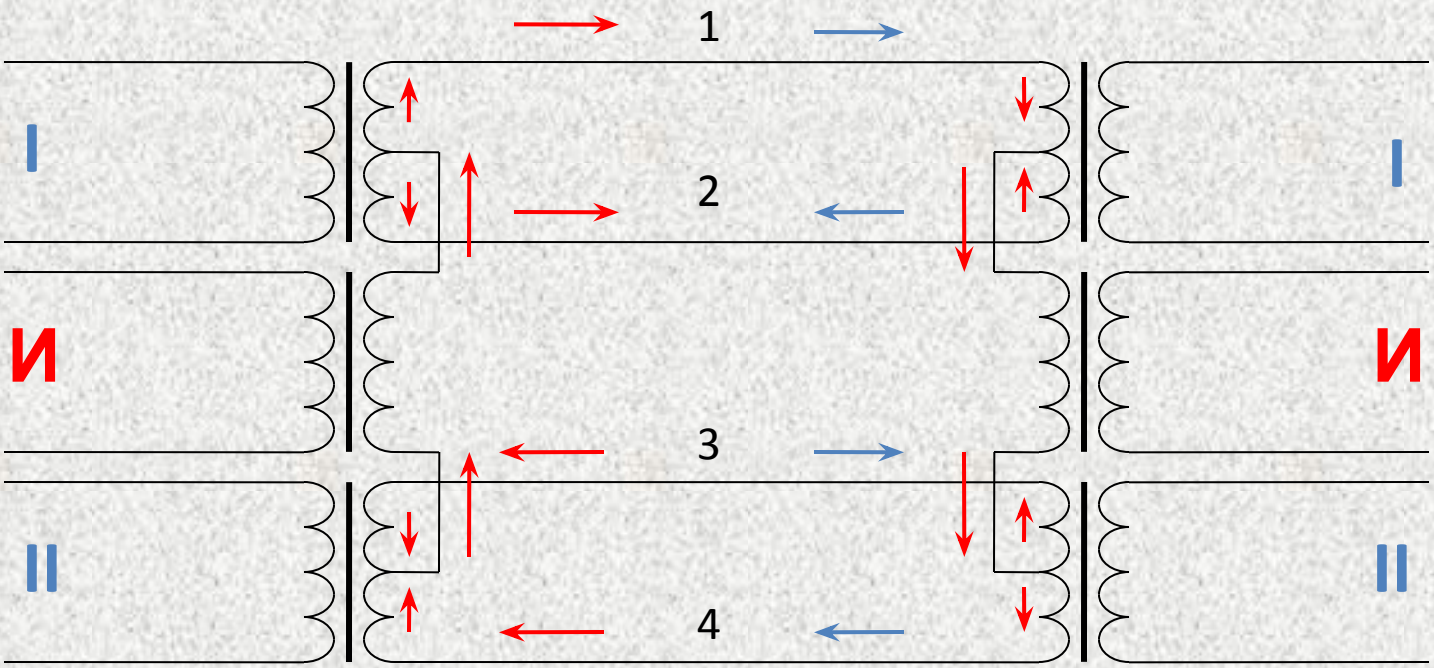
Учитывая, что среди всех действующих связей доминирует емкостная связь, для удобства производства измерений в процессе монтажа симметричных кабелей используются емкостные связи и асимметрии.

Связи и асимметрии характеризуются тремя коэффициента связей (K_1, K_2, K_3) и три коэффициента асимметрий (e_1, e_2, e_3) .

Коэффициент связи K_1 характеризует связь между первой и второй основными цепями

$$K_1 = (C_{13} + C_{24}) - (C_{14} + C_{23})$$

Коэффициент связи K_2 характеризует связь между первой основной и искусственной цепями



$$K_2 = (C_{13} + C_{14}) - (C_{23} + C_{24})$$

Коэффициент связи K_3 характеризует связь между второй основной и искусственной цепями

$$K_3 = (C_{13} + C_{23}) - (C_{14} + C_{24})$$

Коэффициент асимметрии e_1 характеризует связь между первой основной цепью и землей

$$e_1 = C_{10} - C_{20}.$$

Коэффициент асимметрии e_2 характеризует связь между второй основной цепью и землей

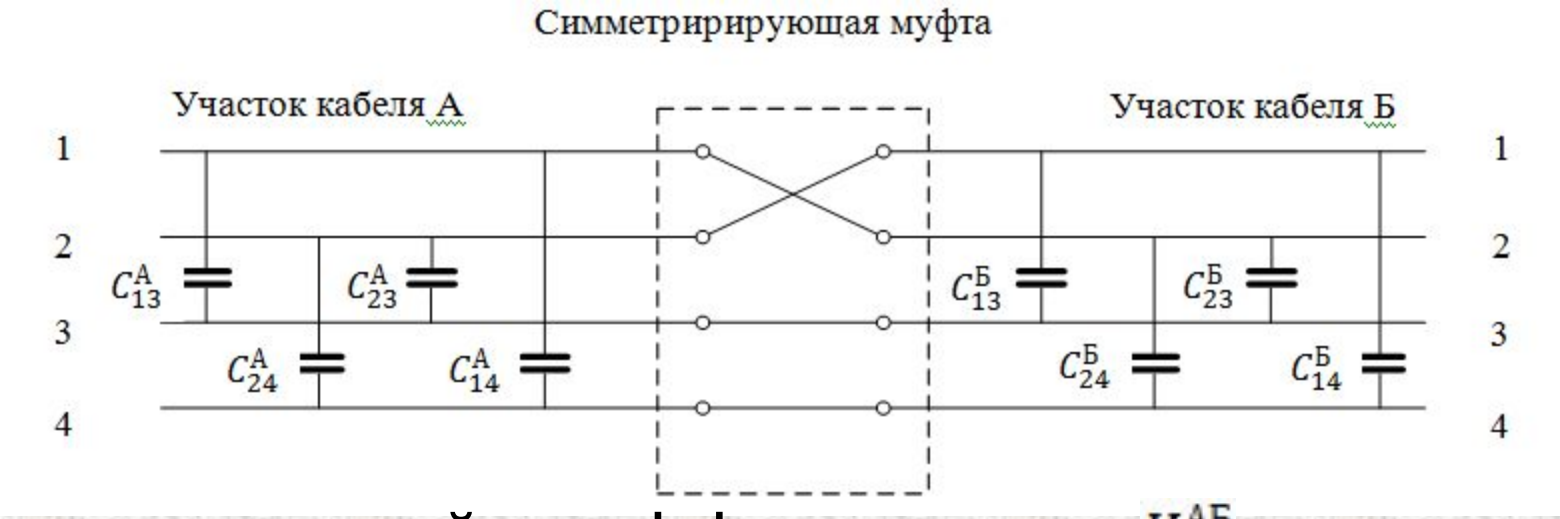
$$e_2 = C_{30} - C_{40}.$$

Коэффициент асимметрии e_3 характеризует связь между искусственной цепью и землей

$$e_3 = (C_{10} + C_{20}) - (C_{30} + C_{40}).$$

2. Симметрирование методом скрещивания.

Симметрирование методом скрещивания заключается в компенсации связей одного участка кабеля связями другого участка кабеля путем соединения жил этих участков напрямую и соединения со скрещиванием.

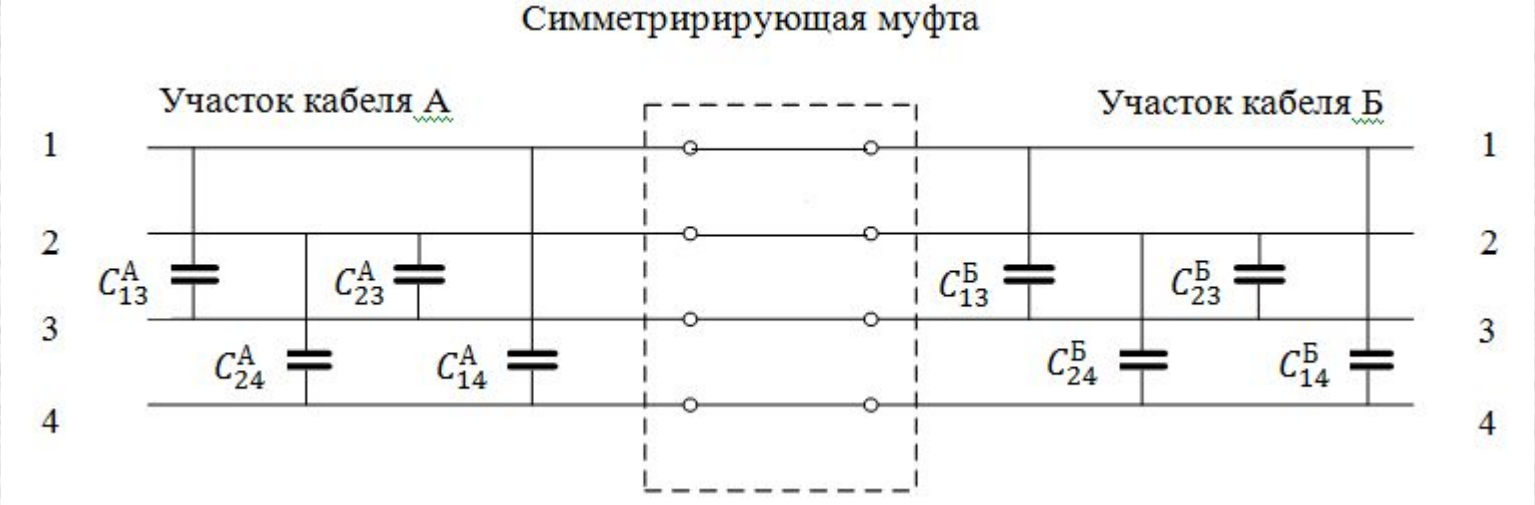


Результирующий коэффициент свя $K_1^{АБ}$ всего участка АБ опред

$$K_1^{АБ} = \left(C_{13}^{АБ} + C_{24}^{АБ}\right) - \left(C_{23}^{АБ} + C_{14}^{АБ}\right) =$$

$$= C_{13}^{А} + C_{23}^{Б} + C_{24}^{А} + C_{14}^{Б} - \left(C_{23}^{А} + C_{13}^{Б} + C_{14}^{А} + C_{24}^{Б}\right) =$$

$$= \left[\left(C_{13}^{А} + C_{24}^{А}\right) - \left(C_{23}^{А} + C_{14}^{А}\right)\right] - \left[\left(C_{13}^{Б} + C_{24}^{Б}\right) - \left(C_{23}^{Б} + C_{14}^{Б}\right)\right] = K_1^{А} - K_1^{Б}.$$



$$K_1^{АБ} = \left(C_{13}^{АБ} + C_{24}^{АБ}\right) - \left(C_{23}^{АБ} + C_{14}^{АБ}\right) =$$

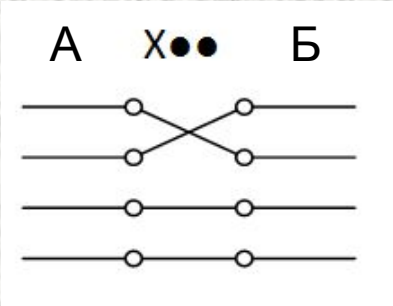
$$= C_{13}^{А} + C_{13}^{Б} + C_{24}^{А} + C_{24}^{Б} - \left(C_{23}^{А} + C_{23}^{Б} + C_{14}^{А} + C_{14}^{Б}\right) =$$

$$= \left[\left(C_{13}^{А} + C_{24}^{А}\right) - \left(C_{23}^{А} + C_{14}^{А}\right)\right] + \left[\left(C_{13}^{Б} + C_{24}^{Б}\right) - \left(C_{23}^{Б} + C_{14}^{Б}\right)\right] = K_1^{А} + K_1^{Б}$$

Допустим в результате измерений, стало известно, что коэффициенты связи двух участков кабеля (А, Б) имеют одинаковые знаки:

K_1(А) = + 280 пФ

K_1(Б) = + 160 пФ



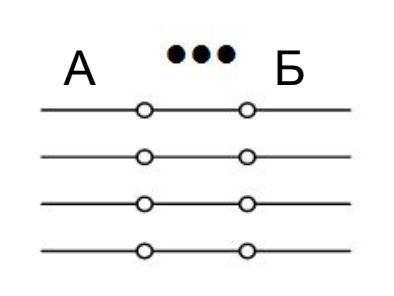
K_1(АБ)=K_1(А)-K_1(Б)

= 280 – 160 = 120

Допустим в результате измерений, стало известно, что коэффициенты связи двух участков кабеля (А, Б) имеют разные знаки:

K_1(А) = + 360 пФ

K_1(Б) = - 220 пФ



K_1(АБ)=K_1(А)+K_1(Б)

= 360+ (– 220) = 140

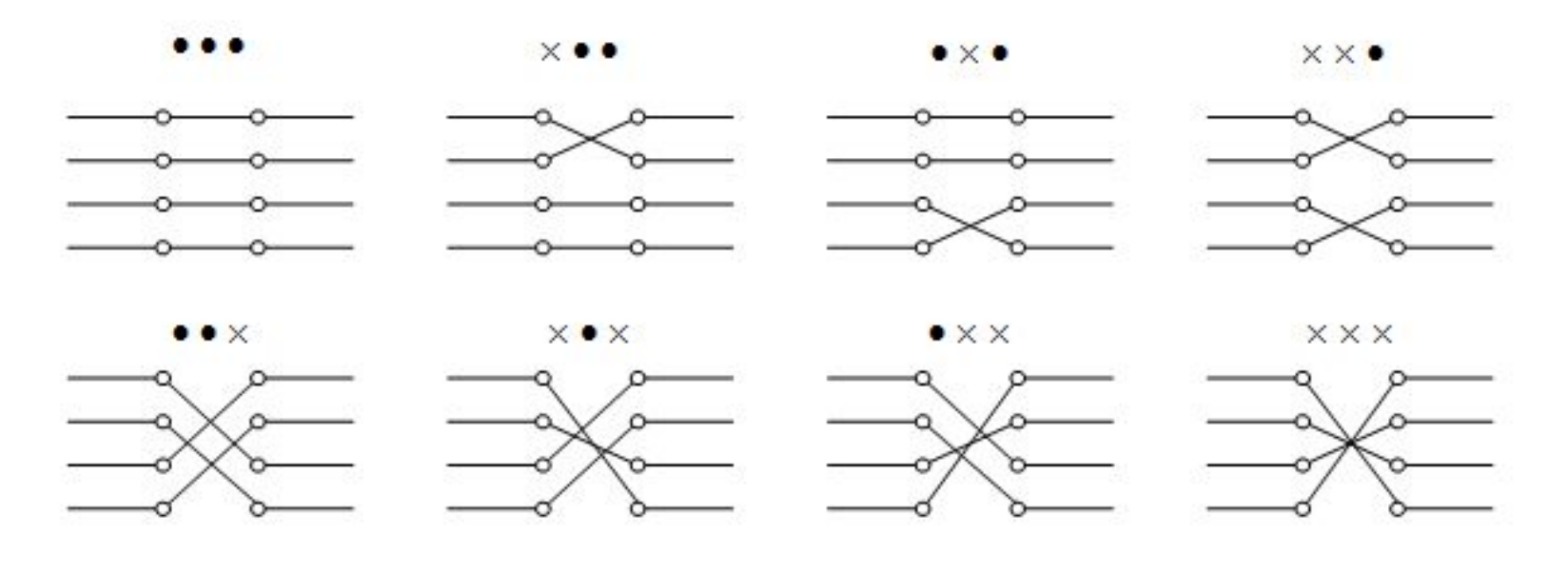
Таким образом, если измеренные связи двух участков кабеля имеют одинаковые знаки, то для компенсации взаимного влияния необходимо производить скрещивание одной из цепей, а если измеренные связи имеют противоположные знаки, то соединение жил выполняется напрямую.

С учетом искусственных цепей известны восемь схем (операторов) скрещивания.

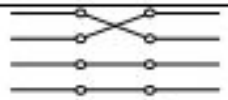
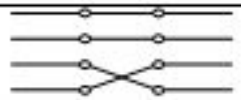
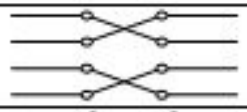
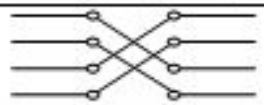
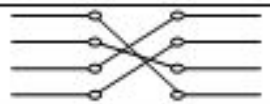
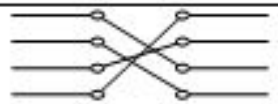
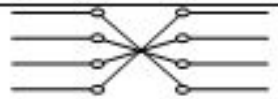
• x

В обозначении операторов скрещивания первая крестик или точка указывают, скрещена или не скрещена первая основная цепь.

Вторые крестик или точка указывают, скрещена или не скрещена вторая основная цепь. Третий крестик или точка характеризуют искусственную цепь.



Результирующие коэффициенты связей и асимметрий

Оператор			Схема соединения		Результирующие связи			Результирующие асимметрии		
I	II	И	Участок А	Участок Б	$K_1^{АБ}$	$K_2^{АБ}$	$K_3^{АБ}$	$e_1^{АБ}$	$e_2^{АБ}$	$e_3^{АБ}$
•	•	•			$K_1^{А}+K_1^{Б}$	$K_2^{А}+K_2^{Б}$	$K_3^{А}+K_3^{Б}$	$e_1^{А}+e_1^{Б}$	$e_2^{А}+e_2^{Б}$	$e_3^{А}+e_3^{Б}$
×	•	•			$K_1^{А}-K_1^{Б}$	$K_2^{А}-K_2^{Б}$	$K_3^{А}+K_3^{Б}$	$e_1^{А}-e_1^{Б}$	$e_2^{А}+e_2^{Б}$	$e_3^{А}+e_3^{Б}$
•	×	•			$K_1^{А}-K_1^{Б}$	$K_2^{А}+K_2^{Б}$	$K_3^{А}-K_3^{Б}$	$e_1^{А}+e_1^{Б}$	$e_2^{А}-e_2^{Б}$	$e_3^{А}+e_3^{Б}$
×	×	•			$K_1^{А}+K_1^{Б}$	$K_2^{А}-K_2^{Б}$	$K_3^{А}-K_3^{Б}$	$e_1^{А}-e_1^{Б}$	$e_2^{А}-e_2^{Б}$	$e_3^{А}+e_3^{Б}$
•	•	×			$K_1^{А}+K_1^{Б}$	$K_2^{А}+K_3^{Б}$	$K_3^{А}+K_2^{Б}$	$e_1^{А}+e_2^{Б}$	$e_2^{А}+e_1^{Б}$	$e_3^{А}-e_3^{Б}$
×	•	×			$K_1^{А}-K_1^{Б}$	$K_2^{А}-K_3^{Б}$	$K_3^{А}+K_2^{Б}$	$e_1^{А}-e_2^{Б}$	$e_2^{А}+e_1^{Б}$	$e_3^{А}-e_3^{Б}$
•	×	×			$K_1^{А}-K_1^{Б}$	$K_2^{А}+K_3^{Б}$	$K_3^{А}-K_2^{Б}$	$e_1^{А}+e_2^{Б}$	$e_2^{А}-e_1^{Б}$	$e_3^{А}-e_3^{Б}$
×	×	×			$K_1^{А}+K_1^{Б}$	$K_2^{А}-K_3^{Б}$	$K_3^{А}-K_2^{Б}$	$e_1^{А}-e_2^{Б}$	$e_2^{А}-e_1^{Б}$	$e_3^{А}-e_3^{Б}$

3. Конденсаторное симметрирование

Конденсаторное симметрирование заключается в выравнивании емкостных связей и асимметрий с помощью дополнительных конденсаторов.

После симметрирования методом скрещивания анализируются оставшиеся связи и асимметрии с помощью следующих уравнений

$$K_1 = (C_{13} + C_{24}) - (C_{14} + C_{23});$$

$$K_2 = (C_{13} + C_{14}) - (C_{23} + C_{24});$$

$$K_3 = (C_{13} + C_{23}) - (C_{14} + C_{24});$$

$$e_1 = C_{10} - C_{20};\ e_2 = C_{30} - C_{40};$$

$$e_3 = (C_{10} + C_{20}) - (C_{30} + C_{40}).$$

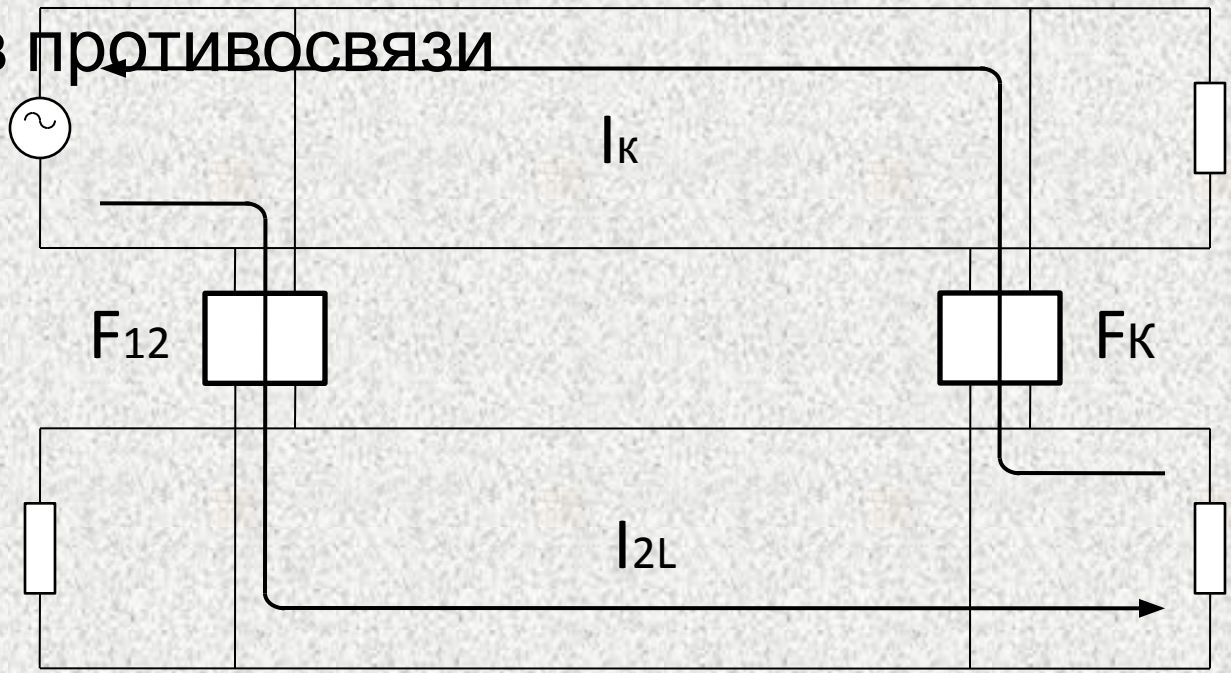
По результатам анализа составляются таблицы, которые и позволяют осуществить выбор симметрирующих конденсаторов.

Оставшиеся значения емкостных связей	Емкости симметрирующих конденсаторов, пф, которые необходимо включить между жилами			
	1 - 3	1 - 4	2 - 3	2 - 4
$K_1 = +1$	-	1/2	1/2	-
$K_1 = -1$	1/2	-	-	1/2
$K_2 = +1$	-	-	1/2	1/2
$K_2 = -1$	1/2	1/2	-	-
$K_3 = +1$	-	1/2	-	1/2
$K_3 = -1$	1/2	-	1/2	-
Суммарное значение, пФ				
Наименьшая вычитаемая емкость, пФ				
Емкости симметрирующих конденсаторов, пФ				

Оставшиеся значения емкостных асимметрий	Емкости симметрирующих конденсаторов, пф, которые необходимо включить между жилами и землей			
	1 - 0	2 - 0	3 - 0	4 - 0
$e_1 = +1$	-	1	1/2	1/2
$e_1 = -1$	1	-	1/2	1/2
$e_2 = +1$	1/2	1/2	-	1
$e_2 = -1$	1/2	1/2	1	-
$e_3 = +1$	-	-	1/2	1/2
$e_3 = -1$	1/2	1/2	-	-
Суммарное значение, пФ				
Наименьшая вычитаемая емкость, пФ				
Емкости симметрирующих конденсаторов, пФ				

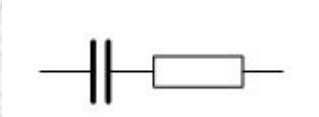
4. Концентрированное симметрирование.

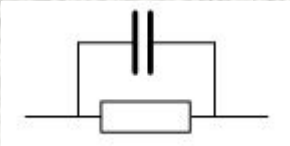
Концентрированное симметрирование заключается в компенсации электромагнитных связей путем включения между симметрируемыми цепями выравнивающих контуров, получивших название контуров противосвязи



Контур противосвязи создает между цепями компенсационный ток равный по величине и противоположный по знаку току помех

Естественная связь имеет комплексный характер, поэтому в состав контура противосвязи должны входить реактивные элементы. Известны следующие способы комплектации контуров противосвязи.





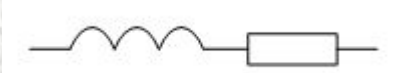
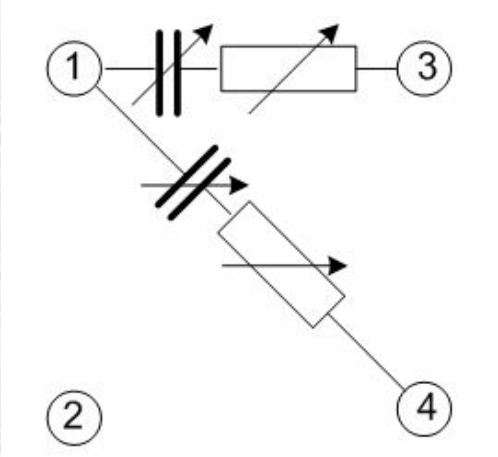


Схема с параллельным включением емкости распространение не получила, так как такое соединение увеличивает проводимость изоляции кабельных жил.



Расчетно-графическая работа № 1

Параметры передачи симметричных кабелей связи.

Задание на РГР.

Произвести расчет первичных и вторичных параметров магистрального кабеля связи на максимальной частоте рабочего диапазона аналоговой аппаратуры или на полутактовой частоте цифровой аппаратуры уплотнения высокочастотных четверок.

Номер варианта		Марка и емкость кабеля	Аппаратура уплотнения
П	0	МКПАБ-7х4х1,2	К-24т
о	1	МКБАБ-14х4х1,2	К-12+12
с	2	МКПАБ-7х4х1,05	К-60п
л	3	МКБАБ-7х4х1,2	К-24т
е	4	МКБАБ-14х4х1,2	К-12+12
д	5	МКСБ-7х4х1,2	К-24т
н	6	МКБ-7х4х1,2	К-24т
я	7	МКСБ-7х4х1,2	К-60п
я	8	МКПАБ-7х4х1,05	ИКМ-120
ц	9	МКСБ-7х4х1,2	ИКМ-120
и			
ф			

Сопротивление двухпроводной кабельной цепи определяется по формуле:

$$R = 2R_0\chi\left[1 + F(kr) + \frac{pG(kr)\left(\frac{d}{a}\right)^2}{1 - H(kr)\left(\frac{d}{a}\right)^2}\right] + R_м$$

, Ом/км

Диаметр повива, мм / Коэф. укрутки	**Значения коэффициента укрутки**					
	До 30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80
Χ	1,010	1,016	1,025	1,037	1,050	1,070

Пересчет потерь в металле ($R_м$) для частоты, отличной от 200 кГц, производится по формуле:

$$R_м = R_т \sqrt{\frac{f}{200000}}$$

$R_т = R_т' + R_т''$ – табличные значения

Число четверок в кабеле	Величина дополнительного сопротивления $R_т$ (Ом) за счет потерь в металлических частях кабеля при f=200 кГц								
	Повив смежных четверок($R_т'$)			Повив внутри свинцовой оболочки($R_т''$)			Повив внутри алюминиевой оболочки($R_т''$)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
4	7,5	-	-	14	-	-	5,2	-	-
1+6	8	7,5	-	1,5	5,5	-	0,6	2	-
1+6+12	8	7,5	7,5	0	0	1	0	0	0,4

kr	F(kr)	G(kr)	H(kr)	Q(kr)
0	0	$(kr)^2/64$	0,0417	1,0
0,5	0,000326	0,000975	0,042	0,9998
1,0	0,00519	0,01519	0,053	0,997
1,5	0,0258	0,0691	0,092	0,987
2,0	0,0782	0,1724	0,169	0,961
2,5	0,1756	0,295	0,263	0,913
3,0	0,318	0,405	0,348	0,845
3,5	0,492	0,499	0,416	0,766
4,0	0,678	0,584	0,466	0,686
4,5	0,862	0,669	0,503	0,616
5,0	1,042	0,755	0,530	0,556
7,0	1,743	1,109	0,596	0,400
10,0	2,799	1,641	0,643	0,282
>10,0			0,750	

Индуктивность двухпроводной кабельной цепи рассчитывается по формуле:

$$L = \left[4 \ln \frac{a - r}{r} + Q(kr) \right] 10^{-4}$$, Гн/км

Емкость двухпроводной цепи определится

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

Проводимость изоляции кабельных цепей определяется по формуле:

$$G = \omega C tg\delta \quad , \text{См/км},$$

Изоляция	ε	$tg\delta \cdot 10^{-4}$ при частоте, кГц				
		100	250	550	2500	4500
Кордельно-бумажная	1,3-1,4	113	160	280	-	-
Кордельно-	1,2-1,3	7	12	20	70	120
стирофлексная	1,2-1,3	6	8	12	33	54
Кордельно-полиэтиленовая						

Вторичными параметрами цепей связи являются волновое сопротивление и коэффициент распространения

$$Z_{в} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}}$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$$

$$\alpha = \left(\frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}\right)8{,}69$$

$$\beta = \omega\sqrt{LC}$$

$$\upsilon = \frac{\omega}{\beta}$$

Расчетно-графическая работа № 2.

Параметры волоконных световодов.

Задание на РГР.

Произвести расчет основных параметров оптических волокон, а также определить пропускную их способность и дальность непосредственной связи.

Значения диаметра сердечника оптических волокон и рабочей длины волны приведены в соответствии с вариантом в табл. Диаметр светоотражающей оболочки для всех вариантов соответствует 125 мкм.

Параметр	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диаметр сердечника (2a), мкм	8,3	50	9,0	62,5	8,7	85	9,0	50	8,3	8,7
Рабочая длина волны (λ), мкм	1,31	0,85	1,55	0,85	1,55	0,85	1,31	1,31	1,55	1,31

Значения ширины спектра излучения и система передачи приведены в табл.

Вариант		Система	Δλ, нм	□$_{сд}$,км
Последняя цифра номера зачетной книжки	0	STM-1	0,5	4
	1	Сопка-1	-	1
	2	Сопка-4м	0,3	4
	3	Соната	-	1
	4	Сопка–4м	0,4	4
	5	Соната	-	1
	6	Сопка-3	0,7	2
	7	Сопка-2	0,8	2
	8	STM-4	0,2	4
	9	Сопка-4	0,6	2

Соната, Сопка-1	2048 кБит/с
Сопка-2	8448 кБит/с
Сопка-3	36 мБит/с
Сопка-4 , Сопка-4м	140 мБит/с
STM-1	155 мБит/с
STM-4	622 мБит/с

Данные для расчета потерь в оптическом волокне приведены в табл.

Параметр	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Параметр устойчивости скрутки	30	12	28	14	26	16	24	18	22	20
Коэффициент микроизгибов	10	15	14	11	12	13	15	10	12	14

1. Расчет показателя преломления компонентов волоконного световода.

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^{3} A_i \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - I_i^2}$$

$$n^2(\lambda) = 1 + A_1 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - I_1^2} + A_2 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - I_2^2} + A_3 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - I_3^2}$$

Состав стекла	Тип коэффициента	Значение коэффициента при , равном		
		1	2	3
SiO_2		0,6961663 0,0684043	0,4079426 0,1162414	0,8974794 9,896161
3,1% G_2O_2 96,9% SiO_2		0,7028554 0,0727723	0,4146307 0,1143085	0,8974540 9,896161

2. Расчет нормированной частоты:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

3. Расчет числа мод в световоде

$$N = \frac{V^2}{2}$$

4. Расчет числовой апертуры.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1\sqrt{2\Delta}$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

5. Расчет волнового сопротивления и коэффициента фазы.

6. Расчет коэффициента затухания.

$$\alpha = \alpha_{с} + \alpha_{к}$$

$$\alpha_{с} = \alpha_{п} + \alpha_{р}$$

$$\alpha_{к} = \alpha_{macro} + \alpha_{micro}$$

$$\alpha_{п} = 8{,}69\frac{\pi n_1 10^9}{\lambda}\mathrm{tg}\delta$$ дБ/км

$$\alpha_p = 4{,}34\frac{8\pi^3}{3\lambda^4}\left(n_1^2 - 1\right)KT\chi 10^{27}$$ дБ/км

$$\alpha_{macro} = \frac{26 \cdot 10^{-3} a}{\Delta d\left[1 + \left(\frac{s}{\pi d}\right)^2\right]}$$ дБ/км

$$\alpha_{micro} = 2 \cdot 10^{-4}\frac{ka^4}{b^6\Delta^3}\frac{\varpi_0^6}{\lambda^4}$$ дБ/км

$$\varpi_0 = a\left(0{,}65 + 1{,}61V^{-1{,}5} + 2{,}879V^{-6}\right)$$ $$V \approx \frac{12{,}97a\sqrt{\Delta}}{\lambda}$$

$$\alpha_{micro} = 10^{-4}\frac{ka^4}{b^6\Delta^3}$$ дБ/км

7. Расчет дисперсии оптического волокна.

$$\tau_{мод} = \frac{(NA)^2}{2n_1 c} \qquad \text{пс/км,}$$

$$\tau_м = \Delta\lambda \cdot M(\lambda), \qquad \text{пс/км,}$$

$$\tau_в = \Delta\lambda \cdot B(\lambda), \qquad \text{пс/км,}$$

$$M(\lambda) = \frac{\lambda}{c} \frac{\sum_{i=1}^{3} \frac{A_i l_i^2 \left(3\lambda^2 + l_i^2\right)}{\left(\lambda^2 - l_i^2\right)^3} - \left(\frac{\partial n}{\partial \lambda}\right)^2}{n_1} 10^9 \qquad \text{пс/(км нм)}$$

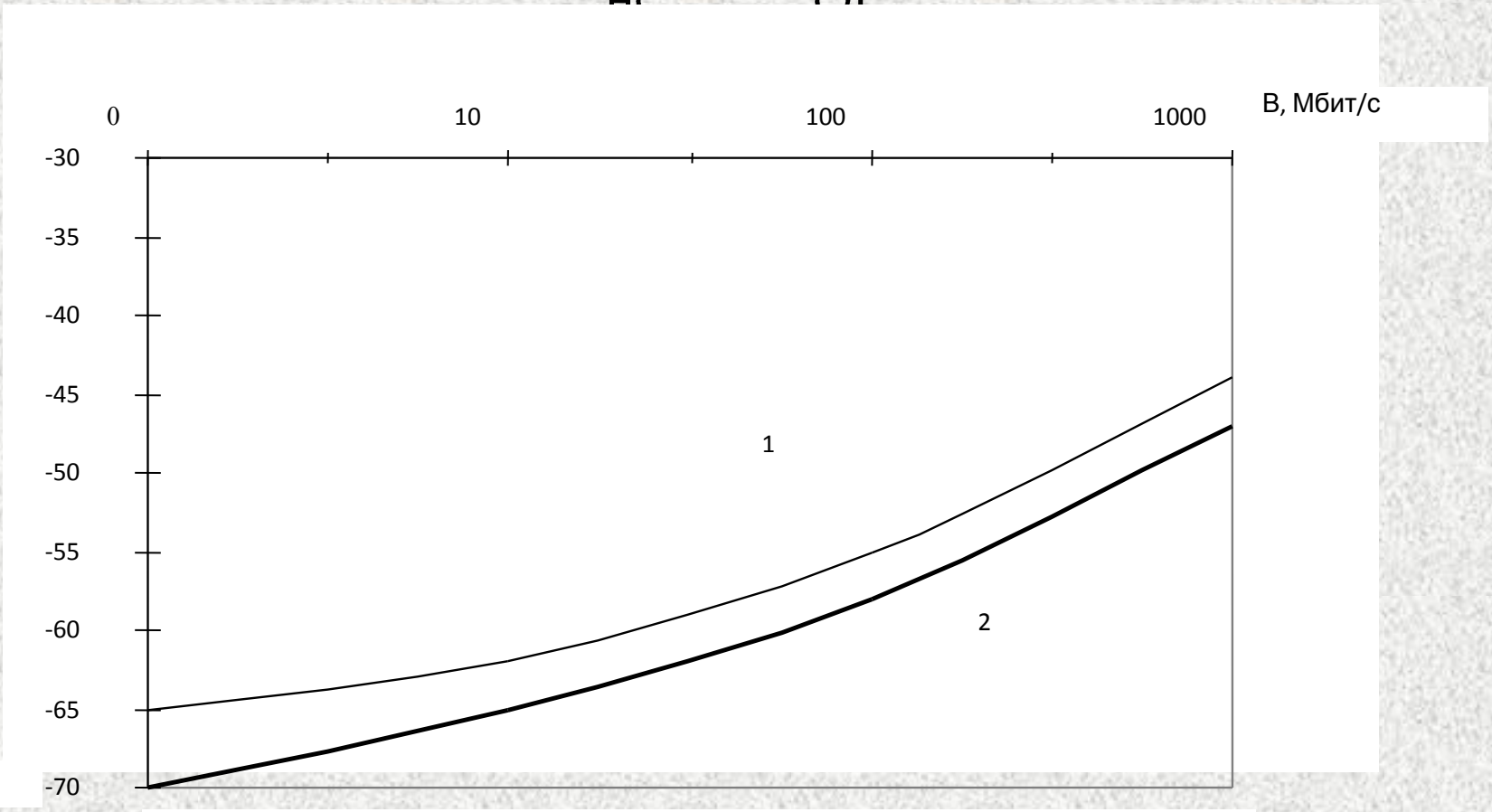
$$\frac{\partial n}{\partial \lambda} = -\frac{\lambda}{n_1}\sum_{i=1}^{3}\frac{A_i l_i^2}{\left(\lambda^2 - l_i^2\right)^2}$$

$$B(\lambda) = \frac{2n_1^2\Delta}{\lambda c}10^9,$$ пс/(км нм)

$$\tau = \left|\tau_м + \tau_в\right|$$ пс/км.

8. Расчет длины регенерационного участка.

$$\square_{р} \leq \frac{П + \alpha_{нс} - 2\alpha_{рс}}{\alpha_{нс} + \alpha\square_{сд}} \square_{сд} \quad км$$



$$\square_p \le \frac{0{,}25 \cdot 10^6}{B\tau} \quad \text{км}$$

Рачетно-графическая работа № 3

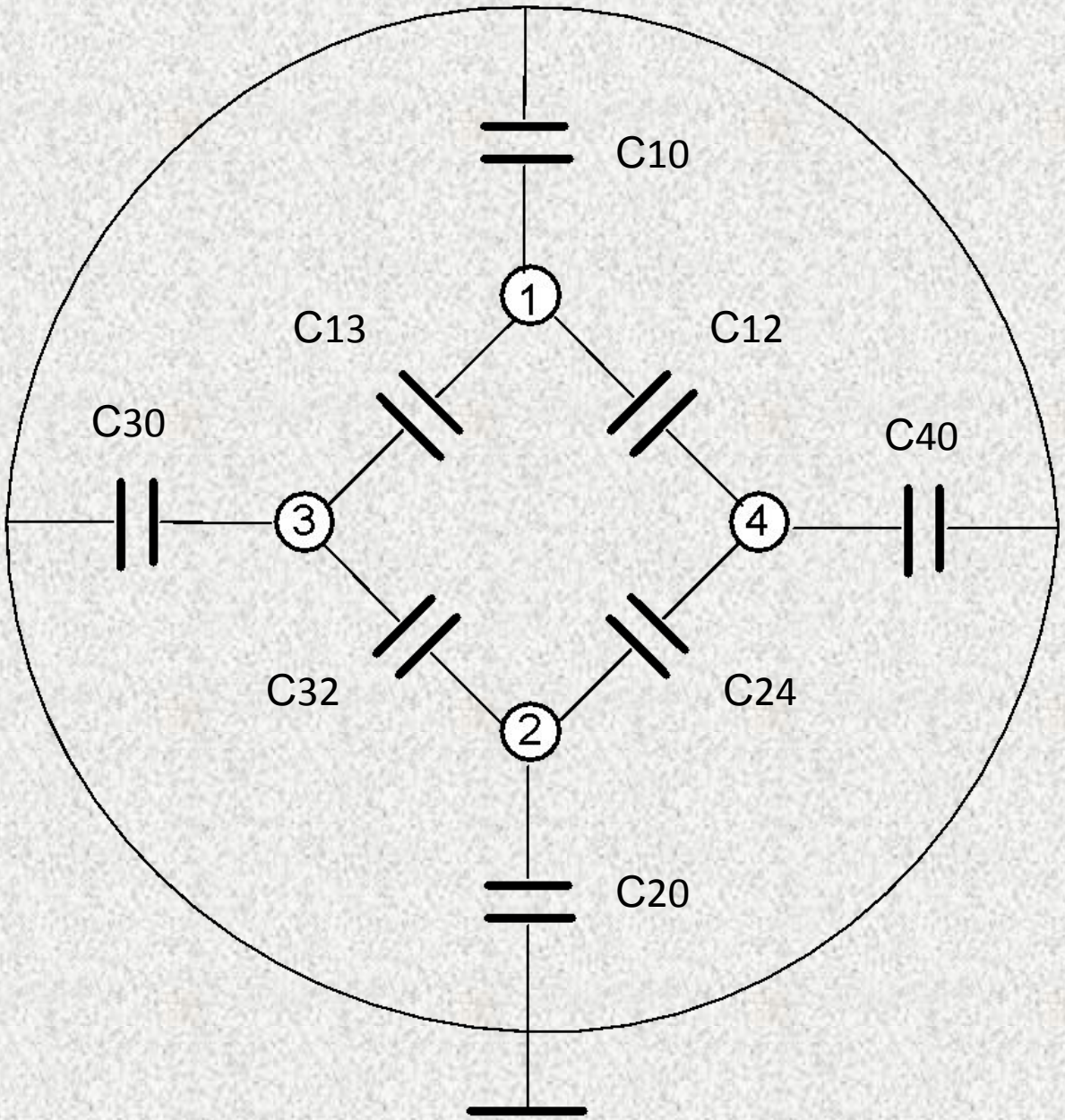
Симметрирование кабелей связи.

Задание на РГР.

Произвести симметрирование низкочастотных цепей симметричного кабеля. Значения емкостных связей и асимметрий двух участков кабеля приведены в соответствии с вариантом в табл. 1 и 2.

Номера вариантов		Значения измеренных емкостных связей (пФ)					
		Участок кабеля А			Участок кабеля Б		
		$К_1$	$К_2$	$К_3$	$К_1$	$К_2$	$К_3$
После	0	+80	-120	+260	-140	+100	-200
дняя	1	+120	-180	+110	+220	-280	-180
цифра	2	-160	+130	+350	+300	-260	-120
номер	3	-240	+170	-270	-110	+120	+290
а	4	+100	+230	-320	-240	+190	+130
зачетн	5	-40	-160	+190	+80	+230	+260
ой	6	-280	+190	-280	+170	+160	-70
книжк	7	-140	-210	+100	-230	-310	+60
и	8	+150	-250	-330	-70	-130	-230
	9	+110	+150	-170	+360	-180	+180

Номера вариантов		Значения измеренных емкостных асимметрий (пФ)					
		Участок кабеля А			Участок кабеля Б		
		e_1	e_2	e_3	e_1	e_2	e_3
Предп	0	-70	+150	-200	+240	+140	-80
ослед	1	-90	+130	+80	-180	+230	-190
няя	2	+120	+80	+130	+160	-260	-180
цифра	3	+110	-60	-240	+210	+180	+160
номер	4	+40	-170	-180	-260	-120	+130
а	5	-80	-140	-120	+200	+270	-170
зачетн	6	-140	+70	+90	-180	-170	+230
ой	7	+50	+160	+220	-90	-210	-110
книжк	8	-60	-190	+70	+170	-90	+280
и	9	+160	-50	-210	-100	+180	+70


C10
1
C13
C12
C30
C40
3
4
C32
C24
2
C20

$$K_1 = (C_{13} + C_{24}) - (C_{14} + C_{23})$$

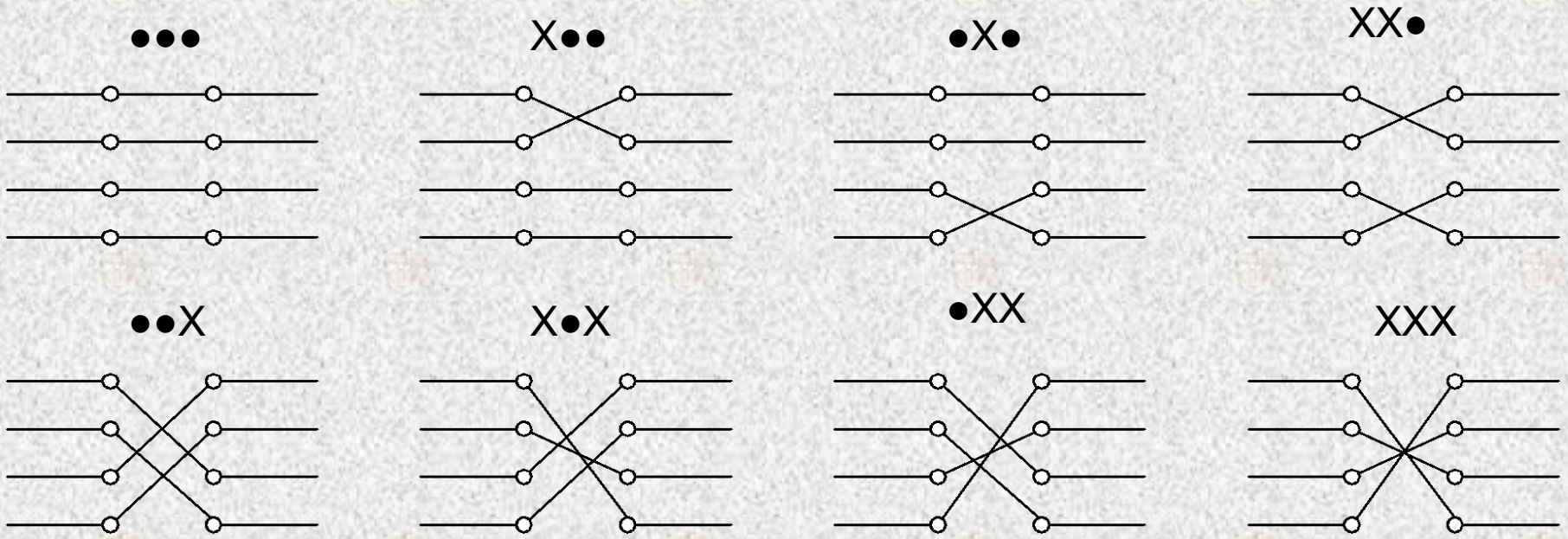
$$K_2 = (C_{13} + C_{14}) - (C_{23} + C_{24})$$

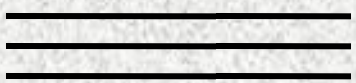
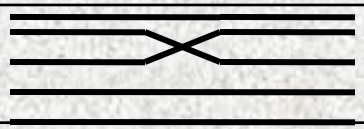
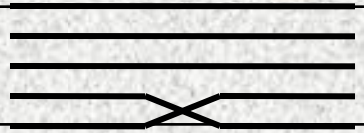
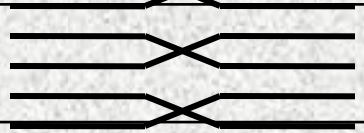
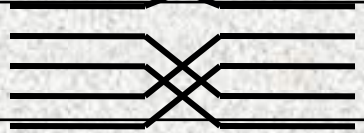
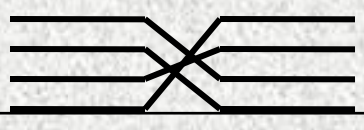
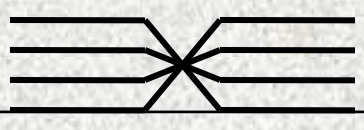
$$K_3 = (C_{13} + C_{23}) - (C_{14} + C_{24})$$

$$e_1 = C_{10} - C_{20}$$

$$e_2 = C_{30} - C_{40}$$

$$e_3 = (C_{10} + C_{20}) - (C_{30} + C_{40})$$


•••
X••
•X•
XX•
••X
X•X
•XX
XXX

Результирующие связи и асимметрии										
Оператор			Схема соединения		$К_1$	$К_2$	$К_3$	$е_1$	$е_2$	$е_3$
I	II	И	Участок А	Участок Б						
●	●	●			$К_1^А+К_1^Б$	$К_2^А+К_2^Б$	$К_3^А+К_3^Б$	$е_1^А+е_1^Б$	$е_2^А+е_2^Б$	$е_3^А+е_3^Б$
x	●	●			$К_1^А-К_1^Б$	$К_2^А-К_2^Б$	$К_3^А+К_3^Б$	$е_1^А-е_1^Б$	$е_2^А+е_2^Б$	$е_3^А+е_3^Б$
●	x	●			$К_1^А-К_1^Б$	$К_2^А+К_2^Б$	$К_3^А-К_3^Б$	$е_1^А+е_1^Б$	$е_2^А-е_2^Б$	$е_3^А+е_3^Б$
x	x	●			$К_1^А+К_1^Б$	$К_2^А-К_2^Б$	$К_3^А-К_3^Б$	$е_1^А-е_1^Б$	$е_2^А-е_2^Б$	$е_3^А+е_3^Б$
●	●	x			$К_1^А+К_1^Б$	$К_2^А+К_3^Б$	$К_3^А+К_2^Б$	$е_1^А+е_2^Б$	$е_2^А+е_1^Б$	$е_3^А-е_3^Б$
x	●	x			$К_1^А-К_1^Б$	$К_2^А-К_3^Б$	$К_3^А+К_2^Б$	$е_1^А-е_2^Б$	$е_2^А+е_1^Б$	$е_3^А-е_3^Б$
●	x	x			$К_1^А-К_1^Б$	$К_2^А+К_3^Б$	$К_3^А-К_2^Б$	$е_1^А+е_2^Б$	$е_2^А-е_1^Б$	$е_3^А-е_3^Б$
x	x	x			$К_1^А+К_1^Б$	$К_2^А-К_3^Б$	$К_3^А-К_2^Б$	$е_1^А-е_2^Б$	$е_2^А-е_1^Б$	$е_3^А-е_3^Б$

Оператор	|кмах|	|емах|
●●●	280	360
x●●	160	440
●x●	430	440
xx●	240	270
●●x	460	430
x●x	320	340
●xx	430	460
xxx	340	380

Оператор	|кмах|	|емах|
●●●	280	360
х●●	240	440
●х●	430	440
хх●	240	270
●●х	460	430
х●х	320	340
●хх	430	460
ххх	340	380

$$K_1 = (\overset{120}{C_{13}} + \overset{120}{C_{24}}) - (C_{14} + C_{23}) = +240 \text{ пФ}$$

$$K_2 = (\overset{80}{C_{13}} + \overset{80}{C_{14}}) - (C_{23} + C_{24}) = -160 \text{ пФ}$$

$$K_3 = (\overset{60}{C_{13}} + \overset{60}{C_{23}}) - (C_{14} + C_{24}) = +120 \text{ пФ}$$

Оставшиеся значения емкостных связей	Емкости симметрирующих конденсаторов, пф, которые необходимо включить между жилами			
	1 - 3	1 - 4	2 - 3	2 - 4
$К_1$ = +240	-	120	120	-
$К_2$ = -160	80	80	-	-
$К_3$ = +120	-	60	-	60
Суммарное значение, пФ	80	260	120	60
Вычитаемая наименьшая величина емкости, пФ	60	60	60	60
Величина емкости включаемых конденсаторов, пФ	20	200	60	-

$$e_1 = \overset{380}{C_{10}} - \overset{110}{C_{20}} = -380 \text{ пФ}$$

$$e_2 = \overset{220}{C_{30}} - \overset{190}{C_{40}} = +220 \text{ пФ}$$

$$e_3 = (\overset{130}{C_{10}} + \overset{130}{C_{20}}) - (C_{30} + C_{40}) = -260 \text{ пФ}$$

Оставшиеся значения емкостных асимметрий	Емкости симметрирующих конденсаторов, пф, которые необходимо включить между жилами и землей			
	1 - 0	2 - 0	3 - 0	4 - 0
e_1 = - 380	380	-	190	190
e_2 = + 220	110	110	-	220
e_3 = - 260	130	130	-	-
Суммарное значение, пФ	620	240	190	410
Вычитаемая наименьшая величина емкости, пФ	190	190	190	190
Величина емкости включаемых конденсаторов, пФ	430	50	-	220

ev.savin.49@mail.ru