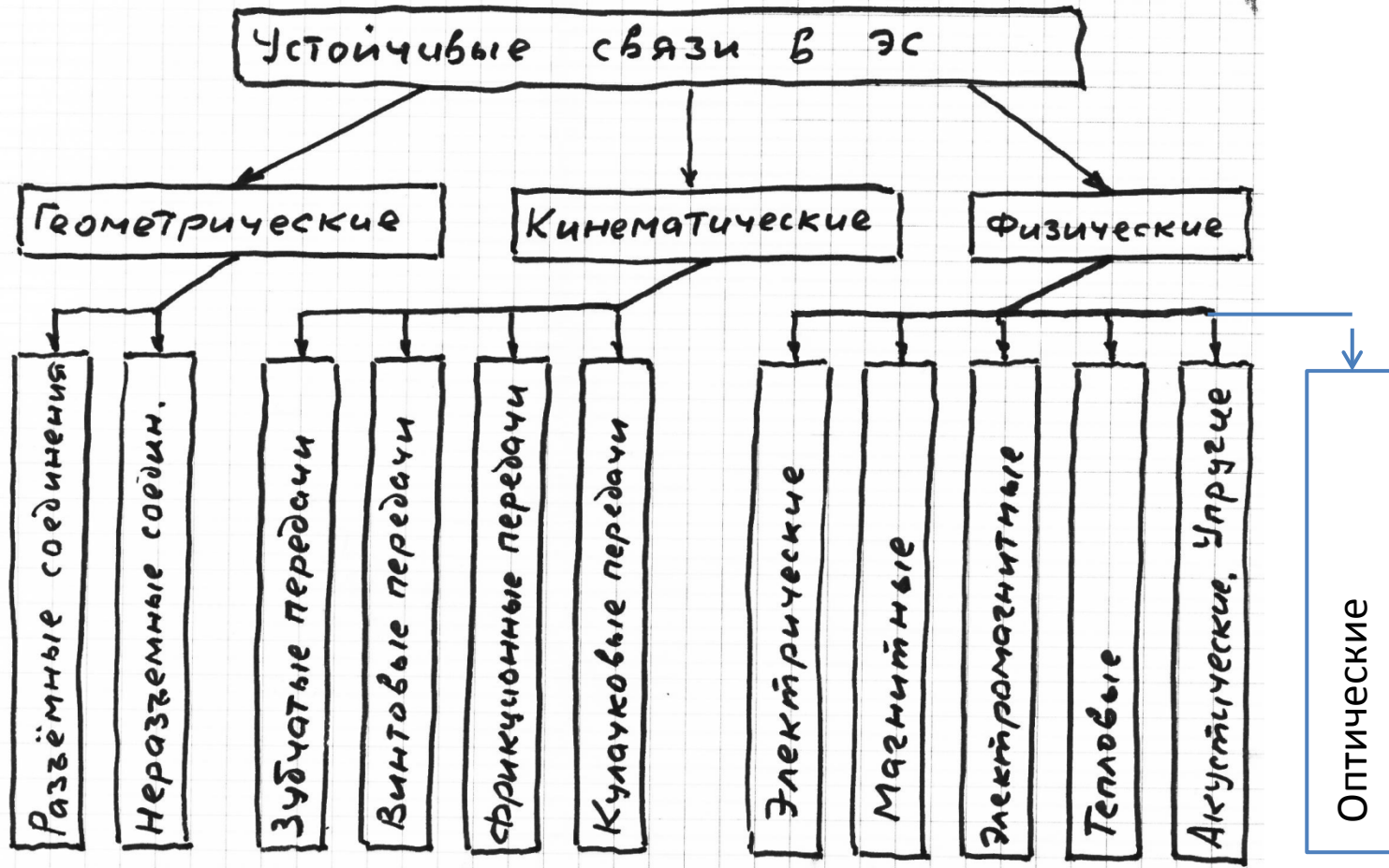


ЭМС

Электо-Магнитная Совместимость

Виды связей



- ЭМС – это
- а) способность РЭС функционировать совместно и одновременно с другими техническими средствами в условиях возможного влияния непреднамеренных электромагнитных помех и
- б) не создавая помех другим РЭС

Три уровня ЭМС

1. Межсистемная ЭМС
2. Внутрисистемная ЭМС
3. Внутриаппаратная ЭМС (ЭМС модулей, ячеек, плат,)

Причины необходимости обеспечения ЭМС в РЭС

- повышением быстродействия полупроводниковых приборов и электронных схем;
- непрерывным возрастанием общего числа РЭС;
- недостаточным числом свободных от помех радиоканалов во всех освоенных диапазонах;
- возрастанием общего уровня помех, главным образом, от промышленных источников;
- усложнением функций и состава РЭС;
- сосредоточением различных видов РЭС в ограниченном пространстве, например на самолете, корабле, ИСЗ;
- миниатюризацией изделий, что в ряде случаев приводит к снижению энергии полезных сигналов и уменьшению отношения сигнал-помеха;
- возрастанием влияния межсоединений и компоновки узлов на помехоустойчивость и быстродействие РЭС.

Законодательство

- В 1959г был распределён частотный ресурс в диапазоне 10 кГц-275 ГГц международными соглашениями для всех стран мира.
- Сейчас существует в мире около 38 различных радиослужб по наблюдению за выполнением международных соглашений.
Основные направления деятельности:
 - ✓ -выявление ЭМ помех во всём диапазоне;
 - ✓ - разработка и утверждение характеристик ЭМС;
 - ✓ Испытания и Сертификация оборудования;
 - ✓ Разработка методов и способов обеспечения ЭМС (новые виды сигналов, модуляции, и т.п.)
 - ✓ Методология эксплуатации РЭС для обеспечения ЭМС
 - ✓ Распределение (выделение частот)

В России

- ГКРЧ- государственный комиссия по радиочастотам при Минкомсвязи (мин-во связи и массовых коммуникаций РФ создано в 2008г)
- любая РЭС с мощностью излучения более 25 мВт должна быть сертифицирована в России в ГКРЧ .
Основные параметры:
 - частота излучения (центр полосы)
 - полоса
 - вид модуляции
 - внеполосные излучения (помехи)

Конструкторско- технологические аспекты ЭМС

- Экранирование
- Фильтрация помех
- Заземление (РЕ, FE)
- Правильные монтажные соединения
- Элементная база
- Источники питания (ист. Вторичного питания)

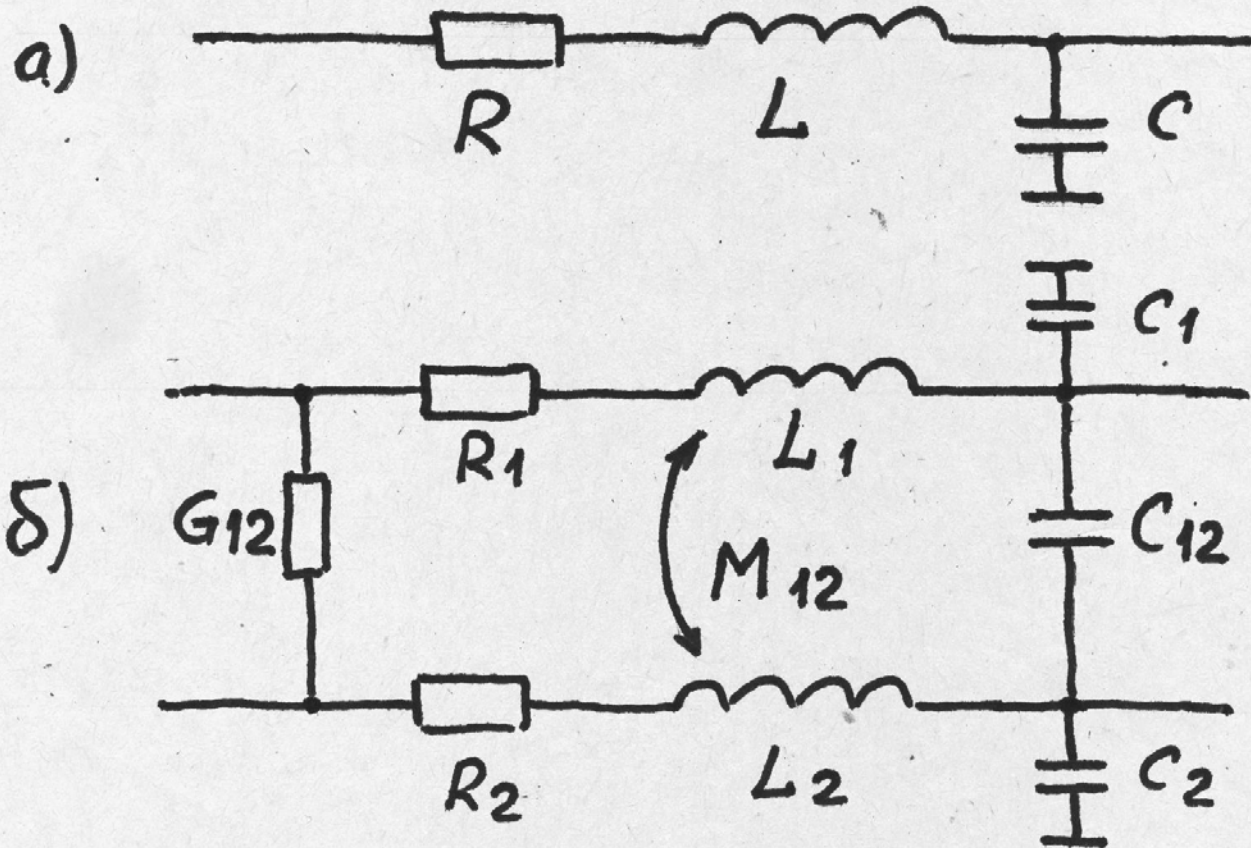
Основные причины помех

- Отражение сигналов от неоднородностей (например от концов несогласованных длинных линий)
- Затухания сигналов при распространении
- Ухудшения фронтов сигналов в линиях передачи с реактивными составляющими
- Задержки в линии связи, вызываемые конечной скоростью распространения сигнала, приводящие к несоответствию фронтов (гонки)
- Перекрёстные наводки (помехи из одной цепи в другую)
- Кондуктивные помехи (с общими проводниками «сигнальной земли и питания)
- Наводки от внешних ЭМ полей

АНАЛИЗ ПОМЕХ

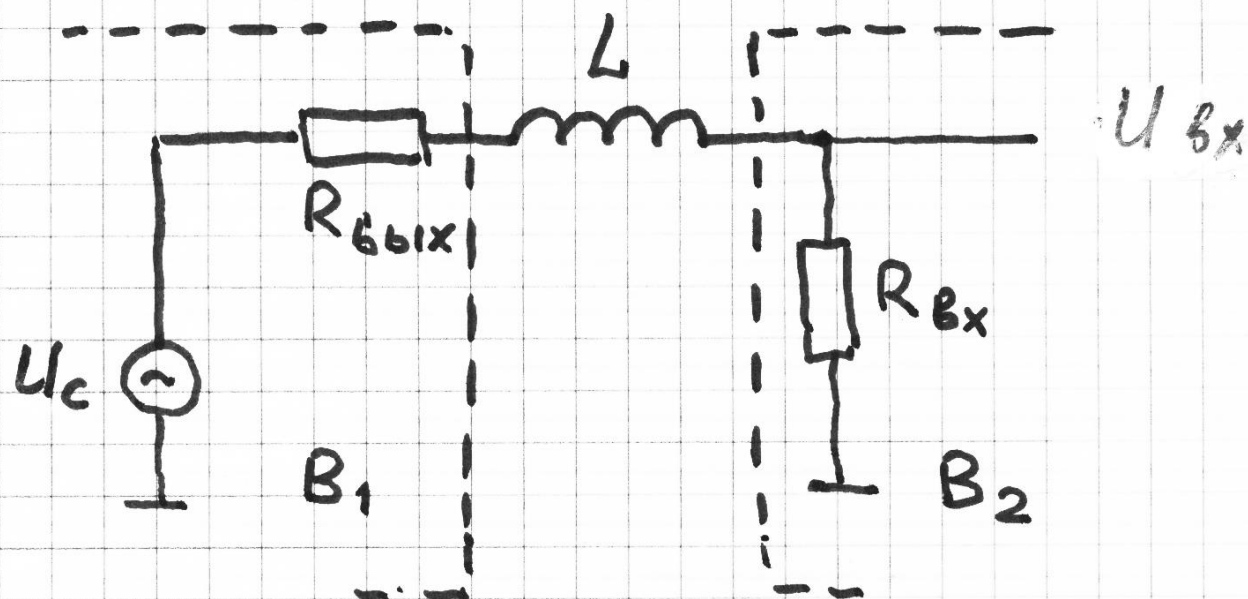
- Анализ Источников и приёмников наводок
- Анализ длины Линии связи (проводники + соединители) как источники и приёмники помех- разделение на электрически короткие и длинные линии)
- Составление эквивалентных схем линий связи (одиночной линии или пар связанных) с внесением паразитных емкостей, индуктивностей, сопротивлений)

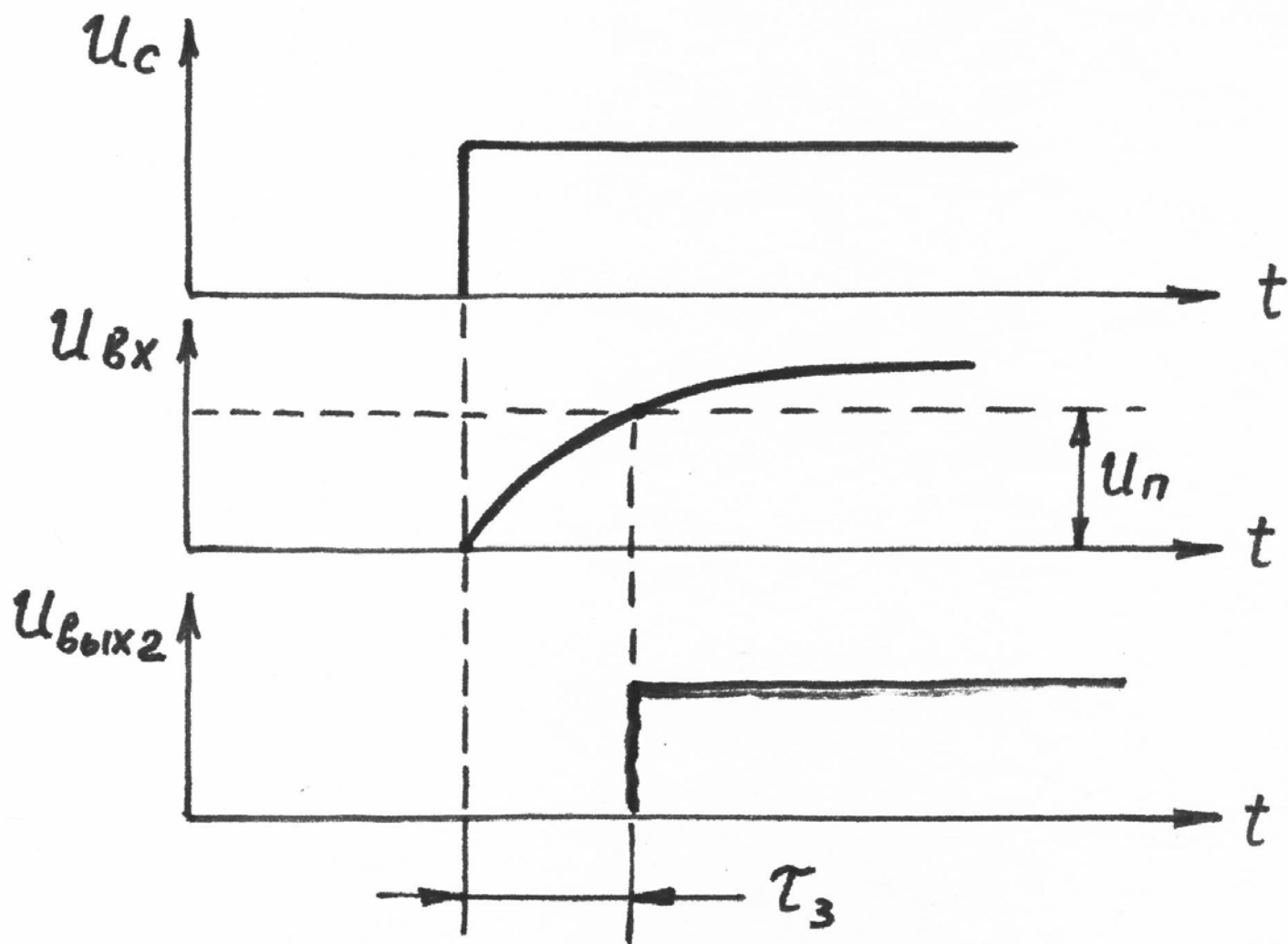
Параметры ЭС



Конструкторское обеспечение ЭМС

- Расчёт ширины (сечения) печатных проводников и зазоров между ними для обеспечения приемлемых паразитных параметров (емкость, индуктивность, взаимная магнитная связь, сопротивление)
- Выбор проводников для линий связи (тип, марка, частотные свойства, затухания, неравномерность АЧХ, макс. Ток, напряжение, сечение)





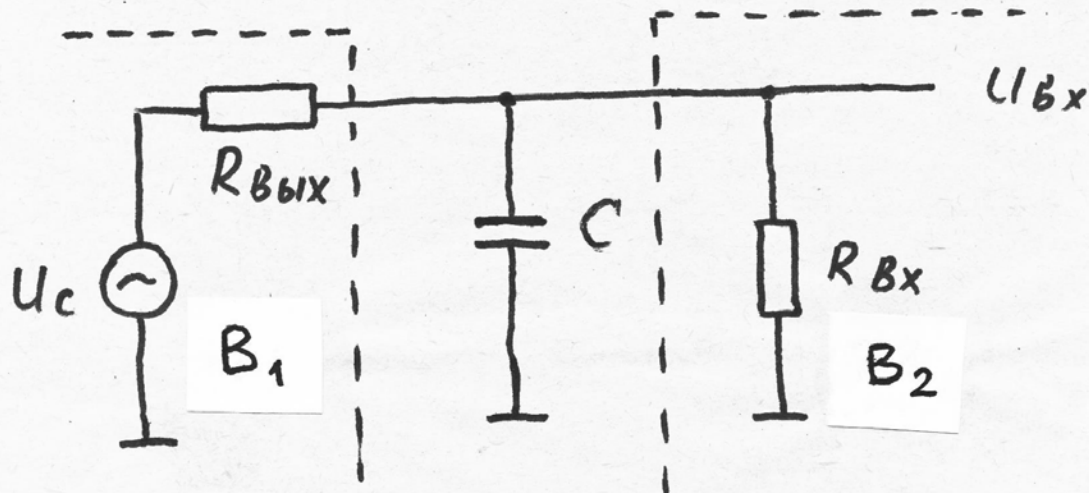
$$U_{Bx} = \frac{R_{Bx}}{R_{Bx} + R_{Bbix}} U_c (1 - e^{-t/\tau}),$$

$$\text{где } \tau = L / (R_{Bx} + R_{Bbix});$$

$$R_{Bx} \gg R_{Bbix}$$

$$U_{Bx} = U_c (1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = L / R_{Bx}$$



$$U_{B_x} = \frac{R_{B_x}}{R_{B_x} + R_{B_{\text{вх}}}} U_c (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$\tau = C \left[R_{B_x} R_{B_{\text{вх}}} / (R_{B_x} + R_{B_{\text{вх}}}) \right]$$

Расчет ЭС по критерию задержки

$$U_{BX} = U_c (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$U_{BX} = U_n; \quad t = \tau_3$$

$$U_n = U_c (1 - e^{-\frac{\tau_3}{\tau}}) \quad (*)$$

$$\tau_3 = -\tau \ln \left(1 - \frac{U_n}{U_c}\right)$$

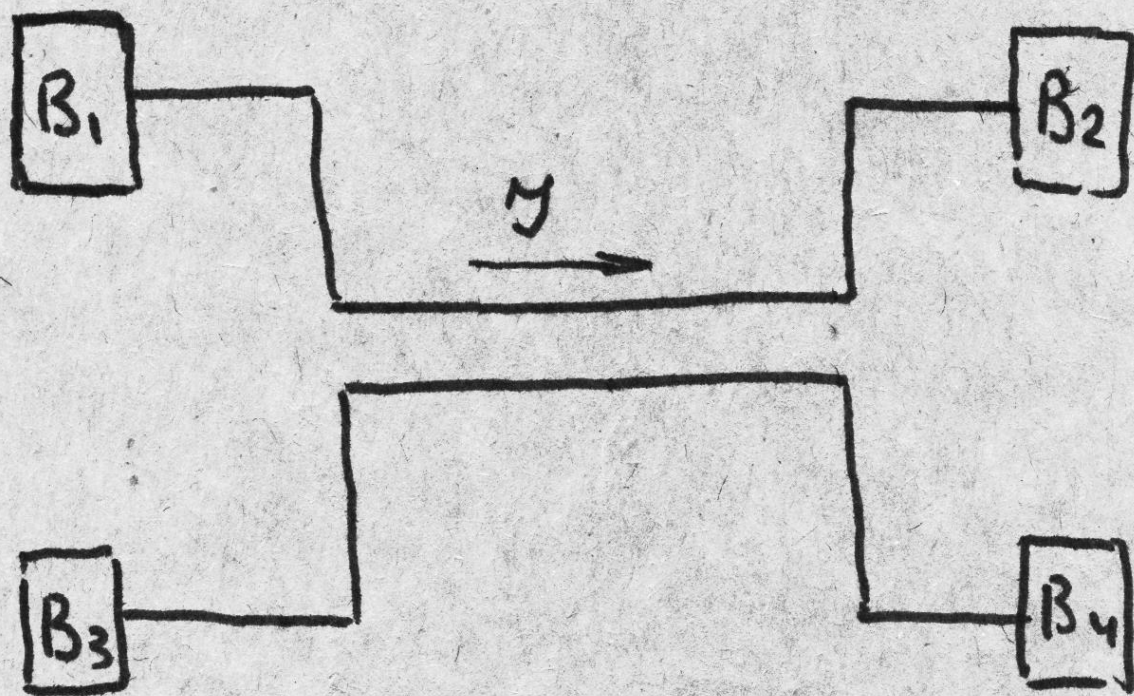
$$\tau_3 = -\frac{L}{R_{BX}} \ln \left(1 - \frac{U_n}{U_c}\right)$$

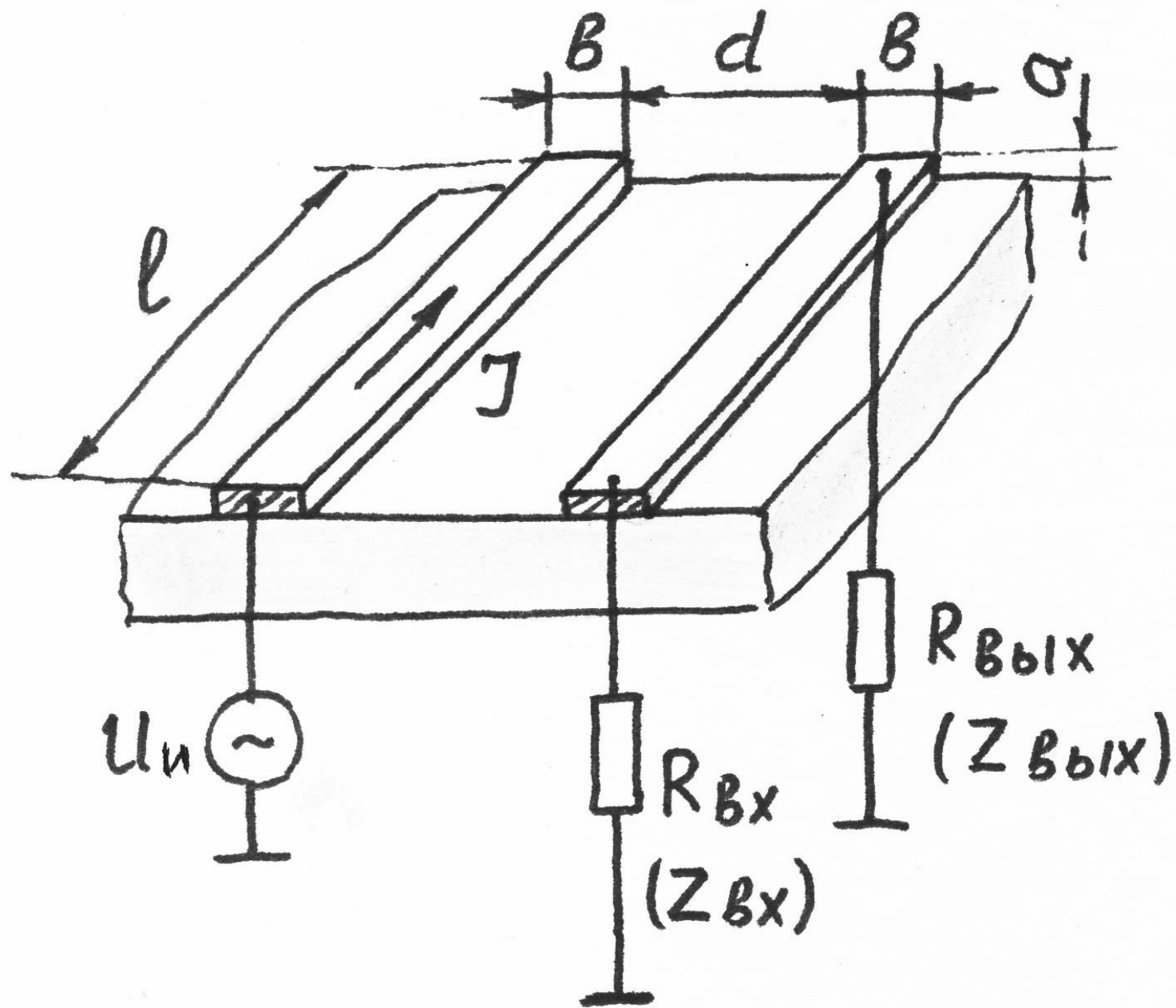
$$\tau_3 = -C R_{BX} \ln \left(1 - \frac{U_n}{U_c}\right)$$

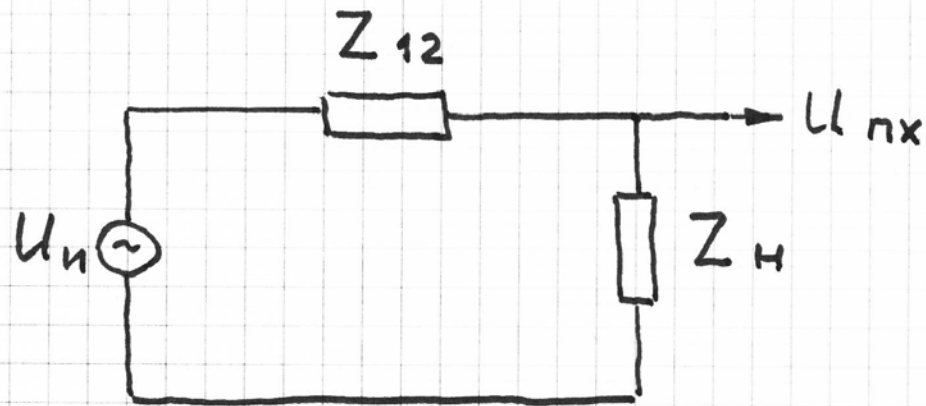
$$L = L_0 \cdot \ell; \quad C = C_0 \cdot \ell$$

$$\tau = -\tau_3 / \ln \left(1 - \frac{U_n}{U_c} \right)$$

Перекрестные наводки в РЭС







$$Z_H = Z_{Bx} Z_{B_{1x}} / (Z_{Bx} + Z_{B_{1x}})$$

$$U_{nx} = U_n \frac{Z_H}{Z_H + Z_{12}}$$

$$Z_H \ll Z_{12}$$

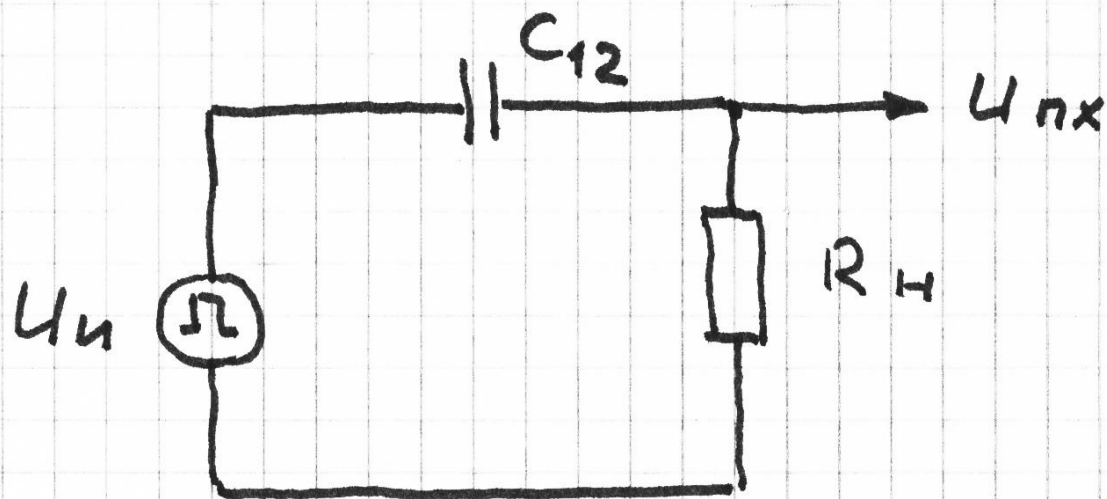
$$U_{\text{пх}} = U_{\text{н}} \frac{Z_{\text{н}}}{Z_{12}} \rightarrow 0$$

Для емкостных Z_{12} и $Z_{\text{н}}$

$$U_{\text{пх}} = U_{\text{н}} \frac{C_{12}}{C_{\text{н}} + C_{12}}$$

$$C_{12} \ll C_{\text{н}}$$

$$U_{\text{пх}} = U_{\text{н}} \frac{C_{12}}{C_{\text{н}}} \rightarrow 0$$



$$R_H = R_{Bx} \parallel R_{B_{bix}}$$

$$U_{nx} = U_H \frac{\tau}{\tau_{\varphi}} \left(1 - e^{-\frac{\tau_{\varphi}}{\tau}} \right)$$

$$\tau = C_{12} \frac{R_{Bx} \cdot R_{B_{bix}}}{R_{Bx} + R_{B_{bix}}}$$

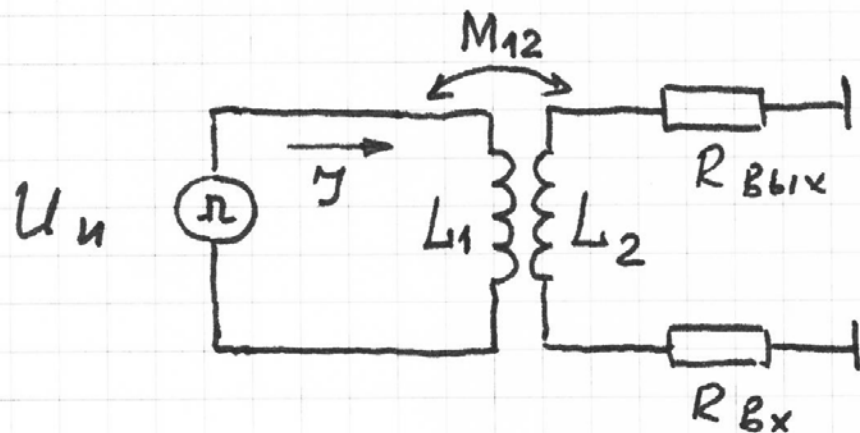
59
Для электрически короткого провод-
ника $\tau_{\text{ф}} \gg \tau$, одновременно $R_{\text{вх}} \gg R_{\text{вых}}$

$$U_{\text{пх}} = U_{\text{и}} \frac{\tau}{\tau_{\text{ф}}} = U_{\text{и}} \frac{C_{12} R_{\text{вых}}}{\tau_{\text{ф}}}$$

$$U_{\text{пх}} < U_{\text{пх доп}}$$

$$C_{12} < U_{\text{пх доп}} \frac{\tau_{\text{ф}}}{U_{\text{и}} R_{\text{вых}}}$$

$$C_{12} = C_{12}(\ell_c, a, b, d)$$



$$U_{nx} = M_{12} J / \tau_{\varphi} < U_{nx \text{ доп}}$$

$$M_{12} < \frac{U_{nx \text{ доп}} \tau_{\varphi}}{J}$$

$$M_{12} = f(l_L, a, b, d)$$

$$M_{12} = 2 l_L \left[2.3 \lg \left(\frac{2b}{b+d} + \frac{b+d}{l_L} + 1 \right) \right] \cdot 10^{-8}, \text{ Гн}$$

Расчет ЭС по критерию допустимой помехи.

$$C_{12} < U_{\text{пх доп}} \tau_{\text{ф}} / (U_c R_{\text{вых}})$$

$$C_{12} = f(l_c, d, b, a)$$

$$l_c = f(U_{\text{пх доп}}, U_c, R_{\text{вых}}, d, b, a)$$

$$M_{12} < U_{\text{пх доп}} \tau_{\text{ф}} / \gamma$$

$$M_{12} = f(l_L, d, b, a).$$

$$l_L = f(U_{\text{пх доп}}, \tau_{\text{ф}}, \gamma, d, b)$$

$$l = l_c l_L / (l_c + l_L)$$

$$\tau_{\varphi} \gg \tau$$

$$U_{\text{пх}} = \frac{U_c \tau}{\tau_{\varphi}} = U_c C_{12} R_{\text{вх}2} / \tau_{\varphi}$$

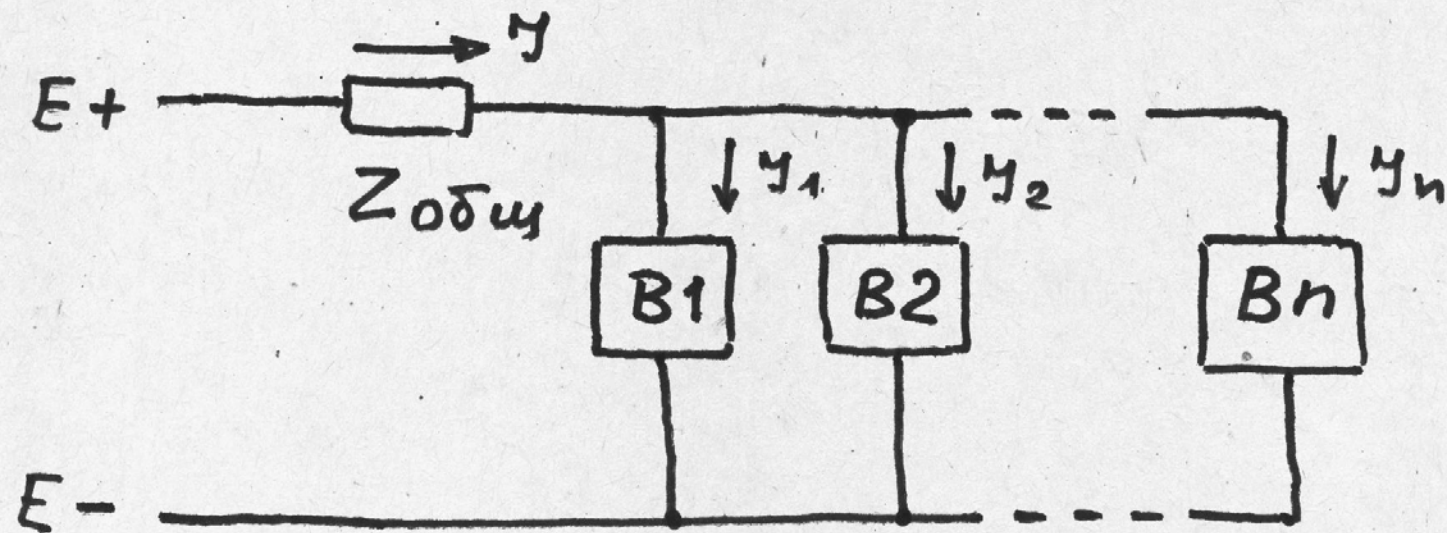
$$U_{\text{пх}} < U_{\text{пх доп}} = U_{\text{п}}$$

$$C_{12} < U_{\text{п}} \tau_{\varphi} / U_c R_{\text{вх}2} ;$$

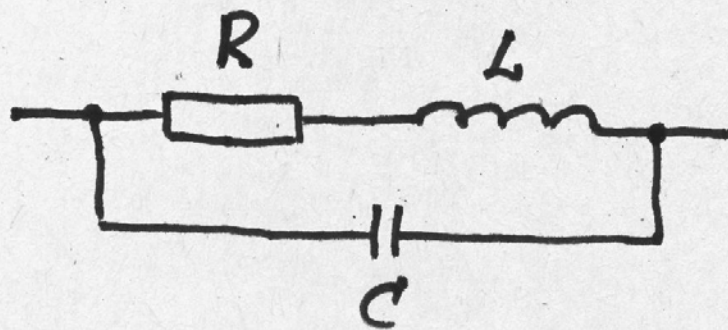
$$C_{12} = 0,12 \cdot 10^{-12} \varepsilon \ell / \lg [2d / (a+b)]$$

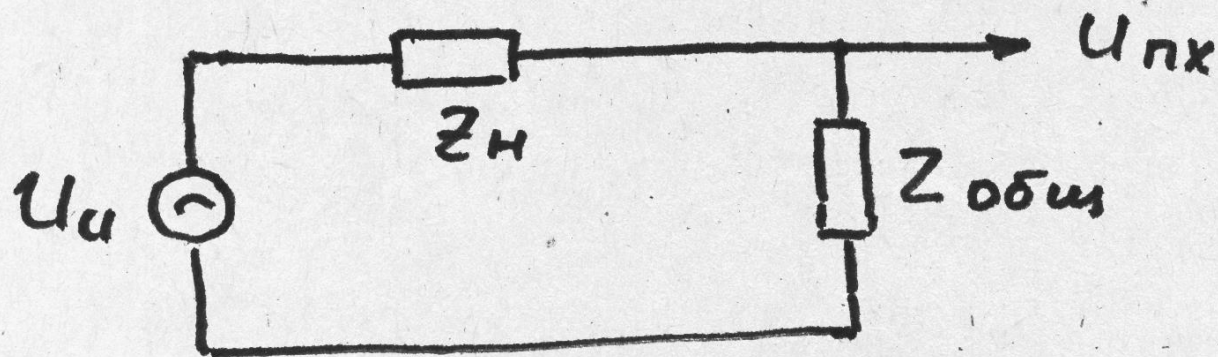
$$\ell_c < \dots$$

Кондуктивные наводки



$$\gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i$$

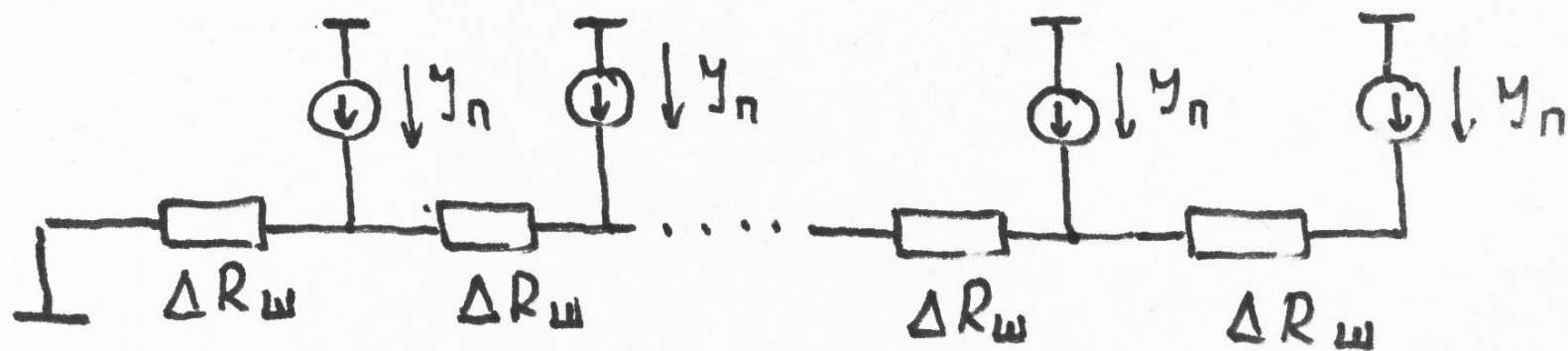
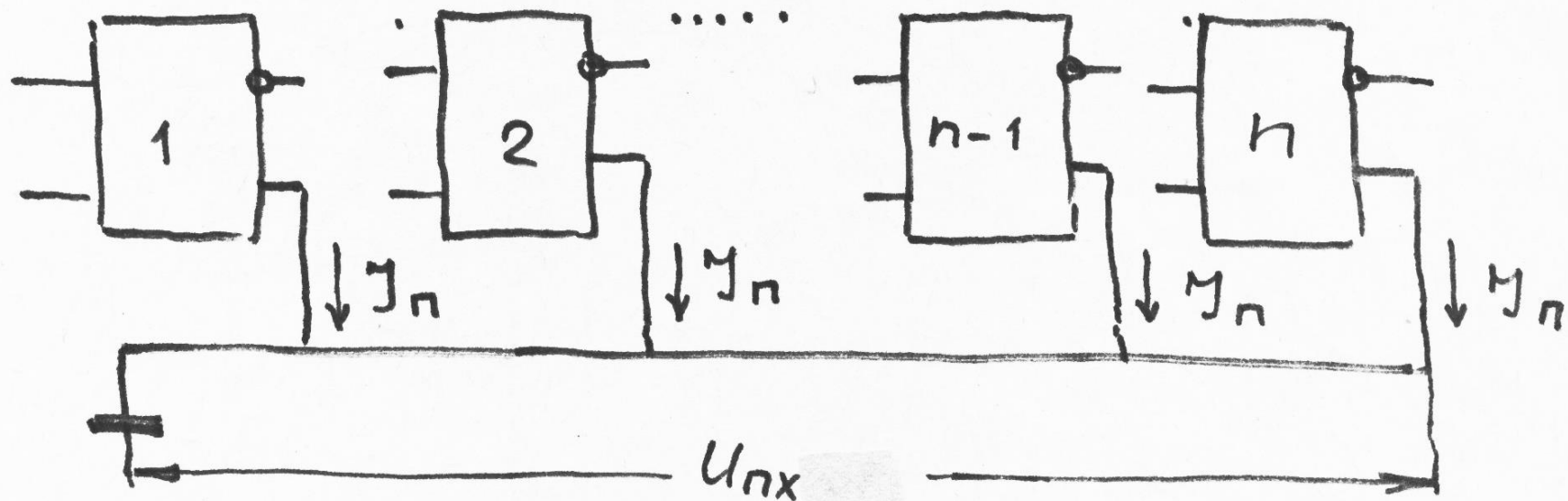




$$U_{пх} = \frac{U_u Z_{обш}}{Z_H + Z_{обш}}$$

$$Z_H \gg Z_{обш}$$

$$U_{пх} = U_u \frac{Z_{обш}}{Z_H} = U_u \cdot K_{св}$$



$$U_{nx} = n \gamma_n \Delta R_{\omega} + (n-1) \gamma_n \Delta R_{\omega} + \dots$$

$$+ 2 \gamma_n \Delta R_{\omega} + \gamma_n \Delta R_{\omega} =$$

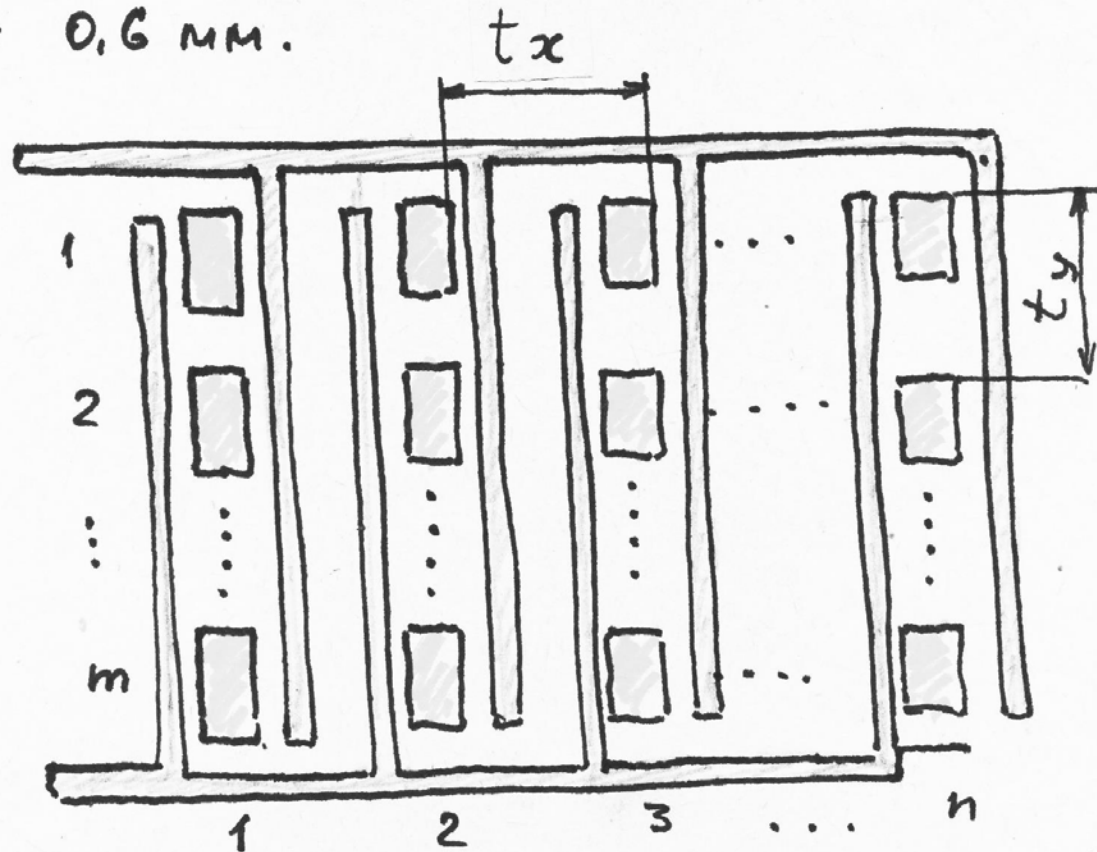
$$= \frac{n(n+1)}{2} \Delta R_{\omega} \gamma_n .$$

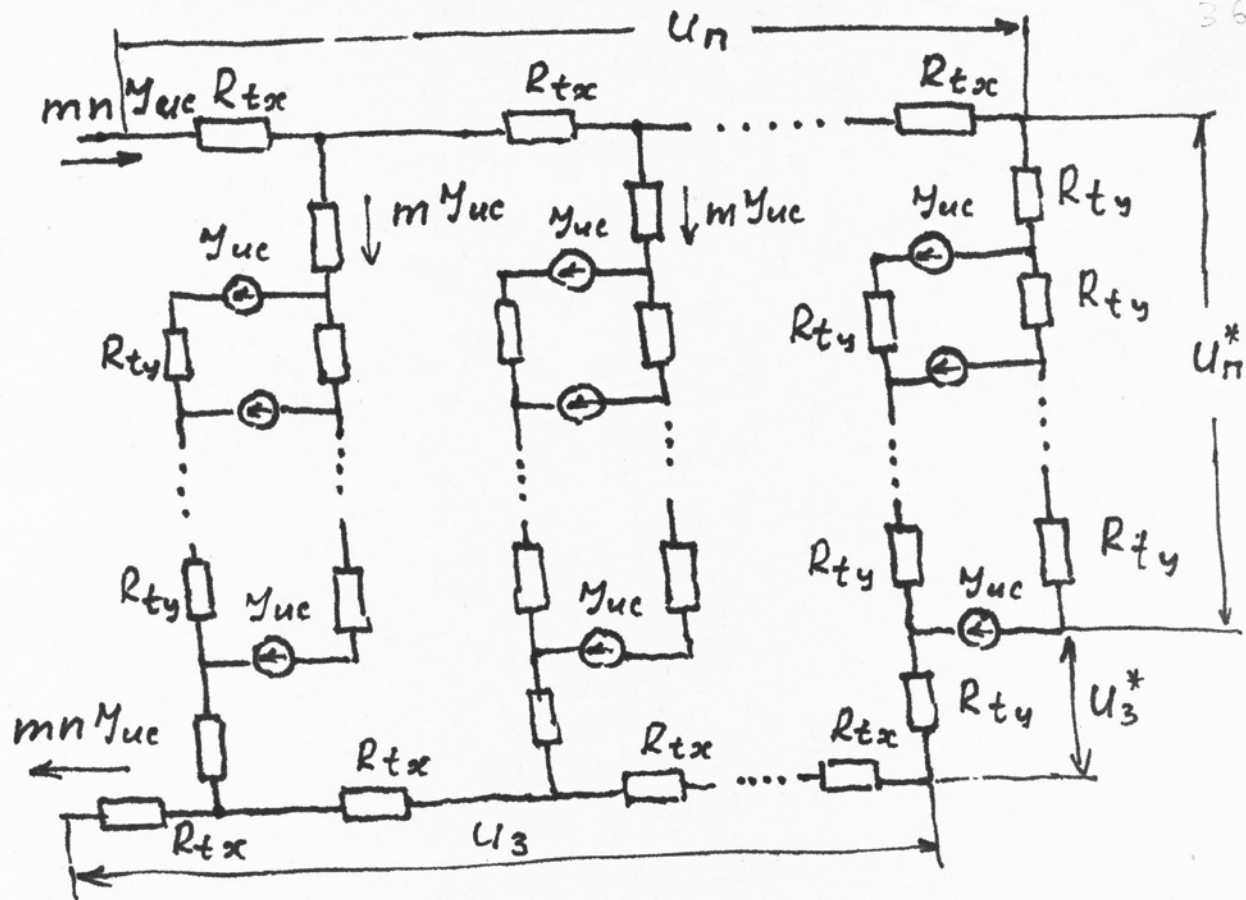
$$U_{nx} < U_n$$

$$\Delta R_{\omega} < 2 U_n / \gamma_n n(n+1) .$$

$$\Delta L_{\omega} < U_{pxdun} \tau_{\varphi} / \Delta \gamma_n (n+1) n$$

$R_{\text{по}} = 0,0010 \text{ м}$, это эквивалентно
 проводнику $b_{\text{пр}} = 0,3 \text{ мм}$, $h_{\text{ф}} = 35 \text{ мм}$
 и $l_{\text{пр}} = 0,6 \text{ мм}$.





Для m -й U_c n -го ряда

37

$$U = U_n + U_n^* + U_3^* + U_3$$

$$\begin{aligned} U = & 2 [mn Y_{uc} R_{tx} + m(n-1) Y_{uc} R_{tx} + \dots + \\ & + m Y_{uc} R_{tx}] + [m Y_{uc} R_{ty} + (m-1) Y_{uc} R_{ty} + \dots + \\ & + Y_{uc} R_{ty} + m Y_{uc} R_{ty}] = \end{aligned}$$

$$= \gamma_{uc} \left[\frac{2m(n+1)n}{2} R_{tx} + \right. \\ \left. + \frac{(m+1)m + 2m}{2} R_{ty} \right].$$

$$R_{tx} = \rho t_x / h_{\varphi} t; \quad R_{ty} = \rho t_y / h_{\varphi} t;$$

$$t \geq \frac{\gamma_{uc}}{0,01 E_K} \frac{\rho}{h_{\varphi}} \left[m(n+1)n t_x + \frac{m^2 + 3m}{2} t_y \right];$$

$$mn = N; \quad n = N/m;$$

$$t \geq \frac{\gamma_{uc}}{0,01 E_K} \frac{\rho}{h_{\varphi}} \left[\left(\frac{N^2}{m} + N \right) t_x + \frac{m^2 + 3m}{2} t_y \right];$$

ЭКРАНИРОВАНИЕ

важное значение имеют понятия о ближней и дальней зонах распространения электромагнитной энергии

λ — длина волны в воздухе

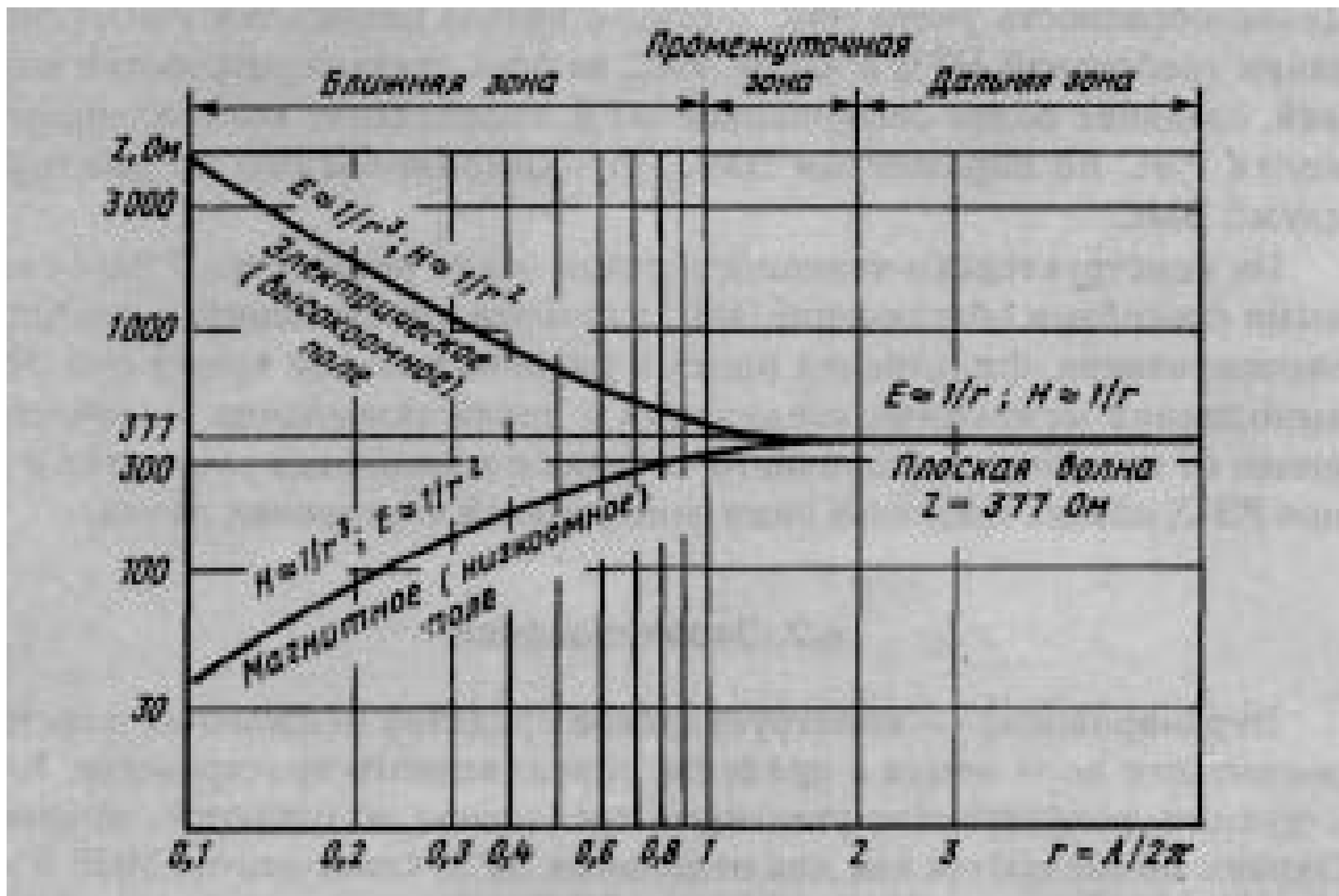
Считаем, что размеры ист помех $L < \lambda$

R- расстояние от источника до приемника помех

□ Ближняя зона $R < \lambda / 2\pi$ (Низкие частоты)
существует отдельно либо

- электрическое поле — для высокоимпедансных чувствительных цепей РЭС и высоковольтных ИП
- Магнитное поле вокруг ИП = проводников с большим переменным / импульсным током.

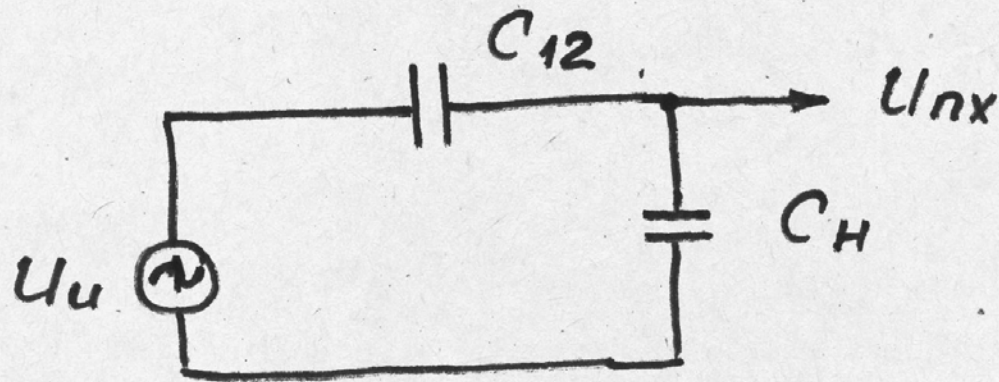
□ Дальняя зона $R > 2 * \lambda / 2\pi$ — сформирована плоская ЭМ волна



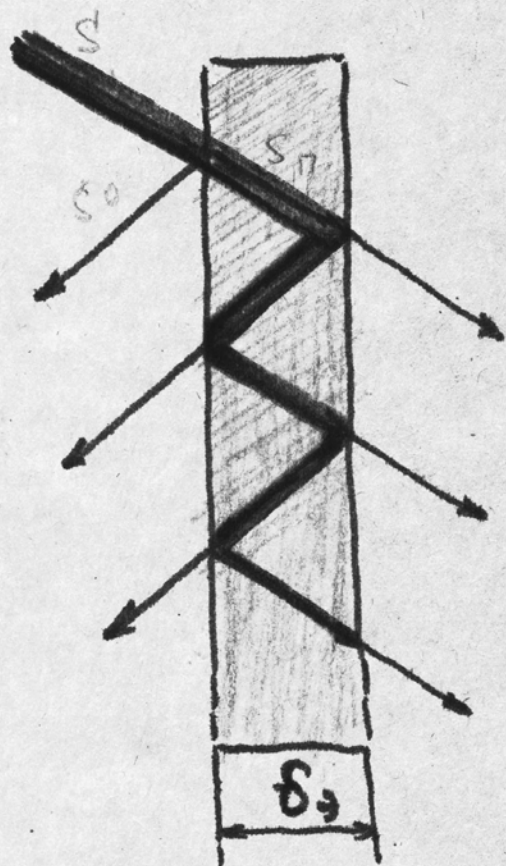
ЭКРАНИРОВАНИЕ

Эффективность экранирования

$$\mathcal{E} = U/U' = \mathcal{M}/\mathcal{M}' = E/E' = H/H';$$



$$C_{12} = C_{пар}$$



$$S = S_0 + S_n$$

$$S_0(E); S_0(H); S_0(P):$$

$$Z_c = \dot{E}_{\text{пад}} / \dot{H}_{\text{пад}} = 377 \text{ Ом}$$

$$Z_d = f(f, \mu, \rho)$$

На низких частотах

Z_d мало и увеличивается
с ростом f .

$$Z_3 = \sqrt{2\pi m f \rho} / (1 - e^{-\delta/8})$$

$$\delta = \sqrt{\rho / (\pi m f)} \quad - \text{толщина скин-слоя}$$

На низких частотах для магнитной составляющей $Z_c \approx Z_3$ $S_0(H)$ - мало

$$S_0(H) = 20 \lg \left[\frac{12}{r} \left(\frac{M}{fG} \right)^{1/2} + \right.$$

$$\left. + 0,5 \cdot 10^{-2} r \left(\frac{M}{fG} \right)^{-1/2} + 0,35 \right], \text{ дБ}$$

r - расстояние между источником и экраном

G - относительная (к меди) электропроводность материала

Для низкочастотных электрических полей $Z_c \neq Z_3$, $Z_c > Z_3$

$$S_0(E) = 350 + 10 \lg \frac{640 G}{f^2 \mu \Gamma^2}, \text{ дБ}$$

Для плоской волны

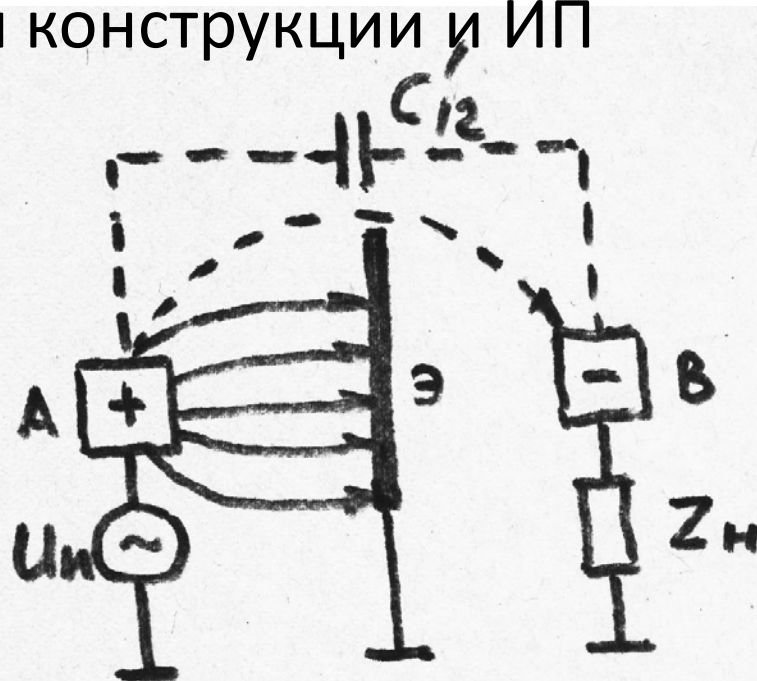
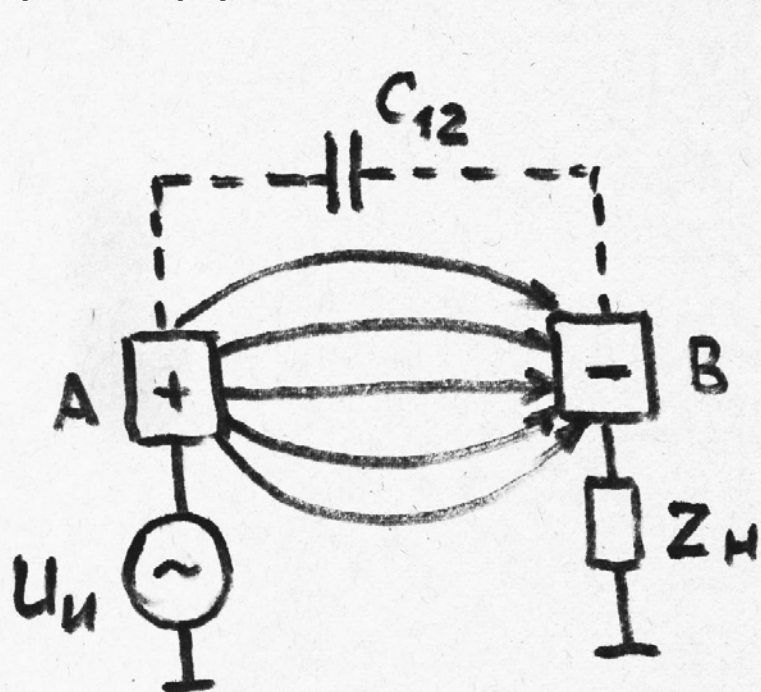
$$S_0(P) = 169 + 10 \lg \frac{G}{\mu f}, \text{ дБ}$$

$$S_n = 0,13 \delta_{\theta} (M G f)^{1/2}, \text{ дБ}$$

Электростатический экран

защищает от электрического поля на НЧ
(ближняя зона)

Основной задачей экранирования электрического поля является снижение емкости связи между экранируемыми элементами конструкции и ИП



$$U_{\vartheta} = U_u \frac{C_1}{C_1 + C_{\vartheta}} ;$$

$$U'_{\pi x} = U_{\vartheta} \frac{C_2}{C_2 + C_H} = \frac{U_u C_1 C_2}{(C_1 + C_{\vartheta})(C_2 + C_H)}$$

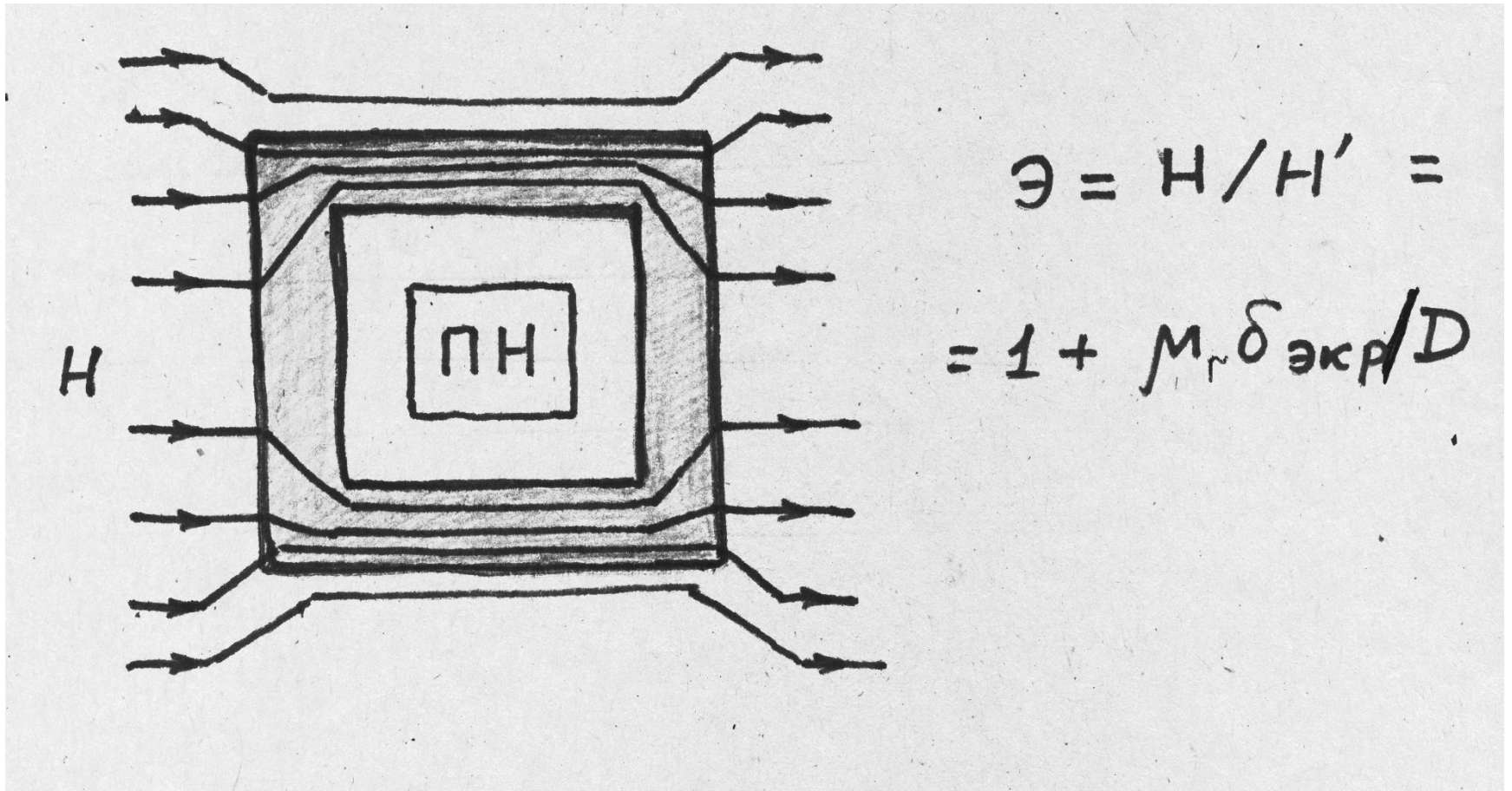
$$C_{\vartheta} \gg C_1, \quad C_H \gg C_2, \quad U'_{\pi x} \rightarrow 0$$

$$U'_{\pi x} = \frac{C'_{12} U_u}{C'_{12} + C_H}; \quad \vartheta = \frac{U_{\pi x}}{U'_{\pi x}} =$$

$$= C_{12} / C'_{12} ;$$

Магнитный экран

из магнитных материалов-сталь, пермаллои, ферриты, никель
Защищает от магнитного поля на НЧ (ближняя зона)



$$\delta = \sqrt{2/(\omega \mu \epsilon)}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r ; \quad \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} \text{ Г/см}$$

$$\delta_{\text{э}} < \delta$$

$$\text{э} = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega \mu \epsilon D \delta_{\text{э}}}{2m} \right)^2}$$

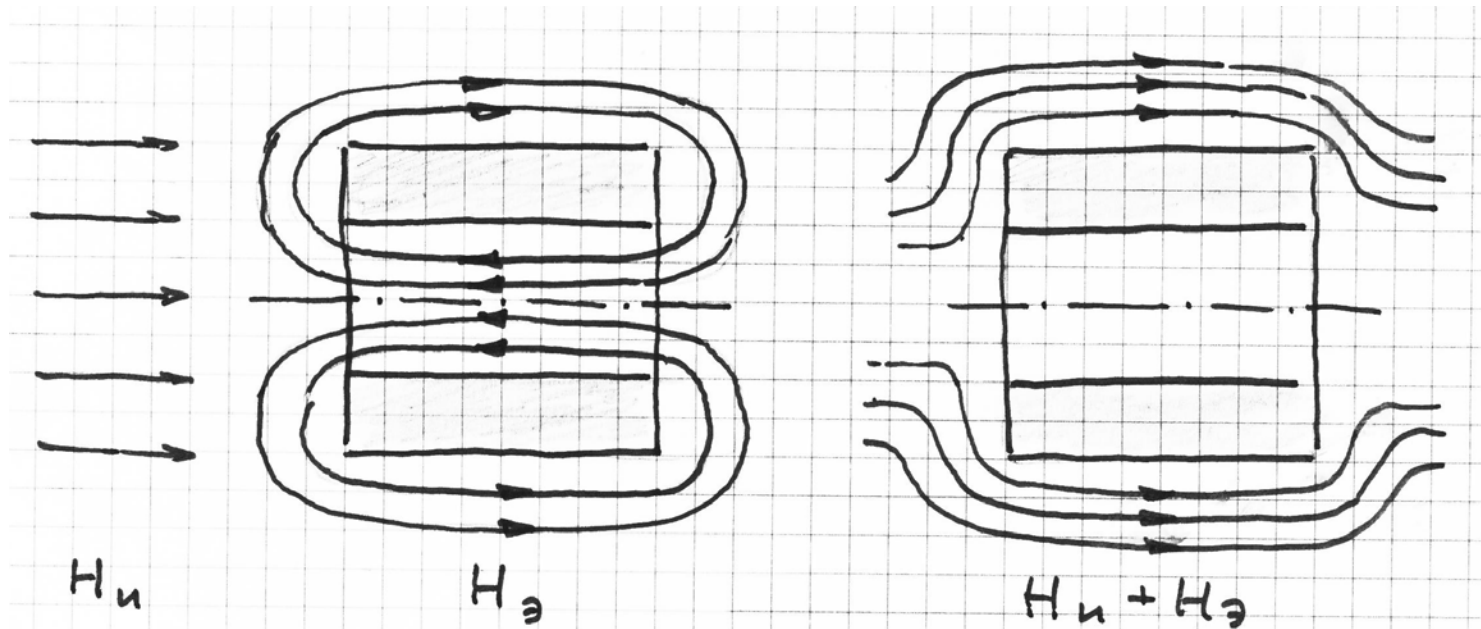
$$m = 1 \quad (\text{прямоуг}) ; \quad m = 2 \quad (\text{цилиндр})$$

$$m = 3 \quad (\text{сфера})$$

ЭМ экран (ЭМ поле токов Фуко компенсирует ЭМ поле помехи)

на ВЧ, СВЧ из хорошо проводящих- медь, латунь, серебро,

Алюминий; чем выше частота, тем нужна лучше проводимость скин слоя (серебрение), и чистота обработки



$$\gamma_x / \gamma_0 = e^{-x/\delta}$$

$$\delta = \sqrt{2 / \omega \mu \sigma}$$

- На ВЧ и СВЧ достаточно тонкой фольги или металлизации внутри или снаружи диэлектрического корпуса
- Дополнительно за счёт металлизации можно получить красивый внешний вид и механическую стойкость к царапинам
- Корпус/кожух РЭС должен быть в виде замкнутого контура (замыкать токи Фуко). Ячейки имеют контактные гребёнки по лицевой планке, замыкая щель вставления ФЯ.
- Вент отверстия дб много меньше λ (как сетка на дверце СВЧ печки)

Для высоких частот

$$\delta_{\text{экр}} > \delta$$

$$\Xi = e^{\delta_{\text{экр}} / \delta \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8 m \mu \delta} \right)}$$

$$m = 1; \quad m = 2; \quad m = 3$$

пр. чип ср.

Для нижних частот

$$\Xi = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{MG} D \delta_{\text{экр}}}{2m} \right)^2}$$

$$\delta_2 > \delta$$

$$\theta = e^{\delta_2/\delta} \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2.8 m_m \delta} \right)$$

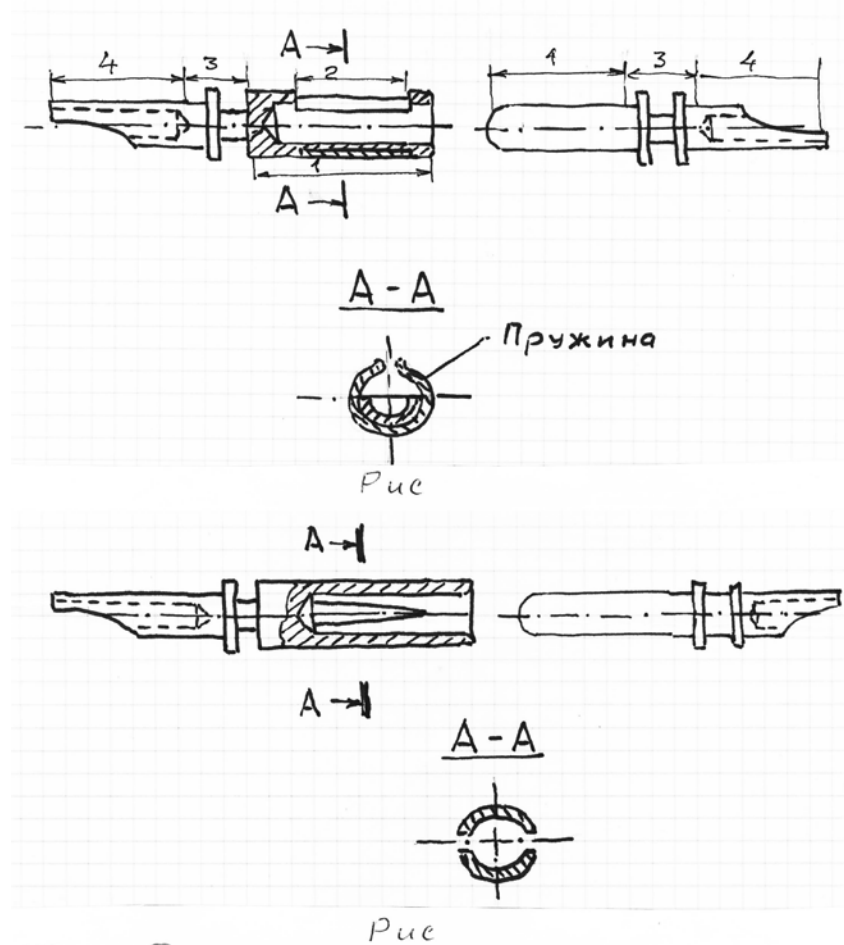
Для СВЧ

$$\theta = \frac{e^{-\delta_2/\delta} \cdot Z_0 \cdot 6030}{4 Z_0 m_m}$$

$f, \text{ Гц}$	Толщина скин-слоя δ мм				
	Медь	Латунь	Алюм	Сталь $\mu_r=100$	Пермаллой
10^2	6,7	12,4	8,8	1,5	0,38
10^4	0,67	1,24	0,88	0,154	0,038
10^8	0,067	0,0124	0,088	—	—

$$\theta_m = 1 + \mu_r \delta \theta_{\text{н}} / D$$

Кондуктивные помехи на соединениях



Электрические параметры

R_n - переходное сопротивление

R_k - контактное сопротивление

R_n имеет активную R_{na} и реактивную X_n составляющие.

R_k обусловлено переходным и омическим сопротивлением материалов обоих контактов. Имеет активную R_{ka} и реактивную составляющие

I_{max} - максимальный рабочий ток

Вид соединения	Переходно е	Механическ ая	Интенсивно сть отказов	Тепловое сопротив
Сварка	0,01...!	100...500	0,1 ...2,0	0,001
Накрутка	1...2	60... 80	0,2 ... 0,5	0,0005
Пайка	2...3	10...40	1 ... 10	0,002
Обжимка	1...10	20...50	2.. .5	0,0008...0.
Соединение токопровод	1...10 Ом м*	5...10	10...50	5

* Удельное объемное сопротивление.

Правильные монтажные соединения

- Соединение экрана (метал. корпуса) с GND в точке близкой к чувствительной к помехе входной цепи , рядом с входным разъемом;
- Соединение экрана только в одной точке для предотвращения петель тока с помехой
- Разветвление проводников GND и питания от одной точки , близкой ко входу, к разным ИС «веером» а не последовательно шлейфом.(уменьшение кондуктивной связи по земле и питанию)
- Изготовление цепей GND и питания в виде отдельных сплошных/сетчатых слоёв
- Электрически длинные цепи согласуют с 2-х сторон резисторами.
- Цепи однотипные в шине (адрес, данные) должны иметь одинаковую длину.
- Печатные проводники должны иметь как можно меньшую длину и максимально- возможное сечение (минимальное сопротивление).
- Проводники GND и питания выполняют повышенной шириной по сравнению с сигнальными
- Между проводниками прокладывают участки/проводники GND
- Входные цепи удаляют от выходных. Вх разъемы удаляют от выходных, располагая на противоположных сторонах ФЯ. Если один разъем, то вх и вых на удаленные ножки разъема, а между ними GND, питание

Фильтрация сигналов

- На входных цепях ставят RC RL фильтры НЧ. Фильтр пропускает полезный сигнал, заграждая прохождение ВЧ помехи.
- На входе ИС применяют защитные диоды, стабилитроны, совместно с низкоомным резистором. Это позволяет ограничить мощные импульсные помехи, защищая вход ИС от пробоя.
- В цепях питания применяют блокировочные конденсаторы (фильтры питания). Часто минимум 1 шт 0.1 мкФ на одну ИС. Для мощных БИС, процессоров, МК несколько керамических и электролитических на каждое напряжения питания (ядра, периферии, аналоговое и т.п)
- Отдельные фрагменты схем разделяют фильтрующими дросселями (например аналоговое питание 3.3В от цифрового)
- Фильтрующие дроссели ставят на входе питающих цепей сразу после разъема питания
- Для импульсных блоков питания на входе цепей питания ставят двойные LC мосты фильтрации синфазных и противофазных помех. Они предотвращают проникновение помех от импульсных цепей БП в сеть и наоборот проникновение помех из сети через БП в РЭС.
- Блоки питания должны иметь схему PFC (коррекцию пик фактора) предотвращающую импульсный (пиковый) ток потребления на вершине синуса напряжения питания при поздарядке конденсатора через выпрямительные диоды. БП с PFC потребляет ток от питающей сети 220/380В почти как активная нагрузка.
- При очень большом K_u (приемник) невозможно получить K_u более 10^5 . Будет самовозбуждение Усиление разносят в разные полосы. (ВЧ, ПЧ1 (ПЧ2 ...) НЧ). В каждой полосе усиление не более 100тыс и возбуждени нет. За счёт фильтрации общего возбуждения удаётся избежать для усилителей K_u более 120Дб (K_u n= более миллиона, K_u p= более миллиарда)

Заземление

- В аппаратных залах/помещениях/отсеках применяют различные виды заземления:
- PE (protect earth) защитное заземление- предназначено для заземления силовых установок. При пробое на заземлённый корпус а) корпус не будет под напряжением, опасным для жизни б) сработает защитный автомат или УЗО
- FE- функциональное заземление- предназначено для заземления корпусов и требуемых заземления цепей чувствительной к наводкам радио и связной аппаратуры, иногда вычислительной. Отделяют от PE. Т.к на PE много помех от силовых установок (двигатели, ИБП и т.п)
- Некоторые блоки РЭС имеют одновременно клеммы PE (обычно 3-я клемма разъема в блоках питания) и FE (корпус)

Элементная база

- Цифровые ИС должны иметь как можно больший уровень допустимой помехи лог 0. Обычно лог 0 от 0В до 0.4В (ТТЛ) Переключение происходит при $U_{вх}=0.8\dots 1В$. Соответственно доп уровень лог 1 желательно поменьше (3.5В .. До 5В для ТТЛ при питании 5В)
- В datasheet файлах для быстродействующих ИС приводится пример топологии разводки критичных цепей.
- Применение блокировочных конденсаторов в цепях питания с хорошими свойствами на ВЧ и СВЧ (малая паразитная индуктивность, высокая емкость) Часто параллельно электролитическим конденсаторам (большая емкость, но плохо работают на СВЧ) применяют керамические конденсаторы
- Входное сопротивление желательно большое, а выходное как можно меньше.
- Для цифро-аналоговых ИС желательно иметь отдельные цепи земли и питания цифровой и аналоговой части.
- Применение ЭБ с передачей сигнала по дифференциальным парам проводников (в отличие от один проводник относительно GND)
- Применение ЭБ с гальванической развязкой (оптопары, трансформаторная, емкостная)
- Применение оптоэлектроники