

Электромагнитная совместимость

и средства защиты

Вводный курс

- **Литература:**

- **Основы электромагнитной совместимости. 2007г. 621.318/О-75 ред.Карякин Р.Н.**
- **Бадер, М.П. Электромагнитная совместимость: Учебник для вузов железнодорожного транспорта / М.П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.**
- **Кравченко В. И., Болотова Е. А., Летунова Н. И., Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987. 256 с.**

- **Дополнительная литература:**

- **Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. / Утверждено: В.С. Аркатов, Ю. Б. Зубарев. М.: Транспорт 1989. 135 с.**
- **Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередач. Министерство связи СССР. М.: Связь.1972.**

- **3. Гроднев И.И., Курбатов Н.Д. Линейные сооружения связи. М.: Связь. 1984.**

-

- **Авторы трудов по ЭМС:**
- **Гроднев И.И., Михайлов М.И., Евсеев И. Г., Малков Н.А., Харлов Н.Н., Хабигер Э., Уайт Д.Р.Ж., Рикетс Л.У., Полонский Н.Б., Каден Г., Вэнс Э.Ф., Шапиро Д.Н., Разевиг Д.В., Адольф И.Шваб, Кантор Л. Н. Коваленков В.И.**

- Понятие электромагнитной совместимости возникло еще в начале развития радиотехники и имело узкое смысловое значение – выбор частотного диапазона
-
- В настоящее время МЭК определяет ЭМС, как **способность оборудования или системы удовлетворительно работать в данной электромагнитной обстановке без внесения в нее какого-либо недопустимого электромагнитного возмущения**

- Любые электронные изделия, способные создавать электромагнитные помехи и (или) восприимчивые к их воздействию, должны быть такими, чтобы:
- – создаваемые ими электромагнитные помехи не превышали уровня, обеспечивающего функционирование радио- и телекоммуникационного оборудования и других изделий в соответствии с их назначением;
- – изделия имели достаточный уровень собственной устойчивости к электромагнитным помехам, обеспечивающий их функционирование в соответствии с назначением.

- **Цель ЭМС - обеспечение нормальной работы совместно работающих технических средств..**
-
- **В реальных условиях в месте расположения электрооборудования действует большое число различного рода излучений, учёт которых возможен при помощи методов теории вероятностей В реальных условиях в месте расположения электрооборудования действует большое число различного рода излучений, учёт которых возможен при помощи методов теории вероятностей и математической статистики.**
-

- В Европе стандарты, связанные с электротехникой, разрабатываются, главным образом, **СЕНЕЛЕК** и **ЕТСИ (ETSI)**.
- **СЕНЕЛЕК**– Европейский Комитет по стандартизации э/м полей, в области электротехники (CENELEC) и электроники (**EN**). Все стандарты СЕНЕЛЕК были первоначально разработаны в **МЭК (включая СИСПР)**.
- **ЕТСИ**– Европейский Институт по стандартизации в области радио и телекоммуникаций (**ETSI**)
- ЕТСИ фокусирует свое внимание на радио и телекоммуникационных стандартах - европейские телекоммуникационные стандарты (ETS).

- Примерный перечень европейских стандартов по ЭМС:
- [EN 55022](#) Электромагнитная совместимость. Радиопомехи от оборудования информационных технологий. Нормы и методы измерений;
- [EN 55011](#) Оборудование промышленное, научно-исследовательское и медицинское. Характеристики радиочастотных помех. Предельные значения и методы измерения характеристик радиопомех;
- [EN 55015](#) Предельные значения и методы измерений характеристик радиопомех электроосветительного и аналогичного оборудования;

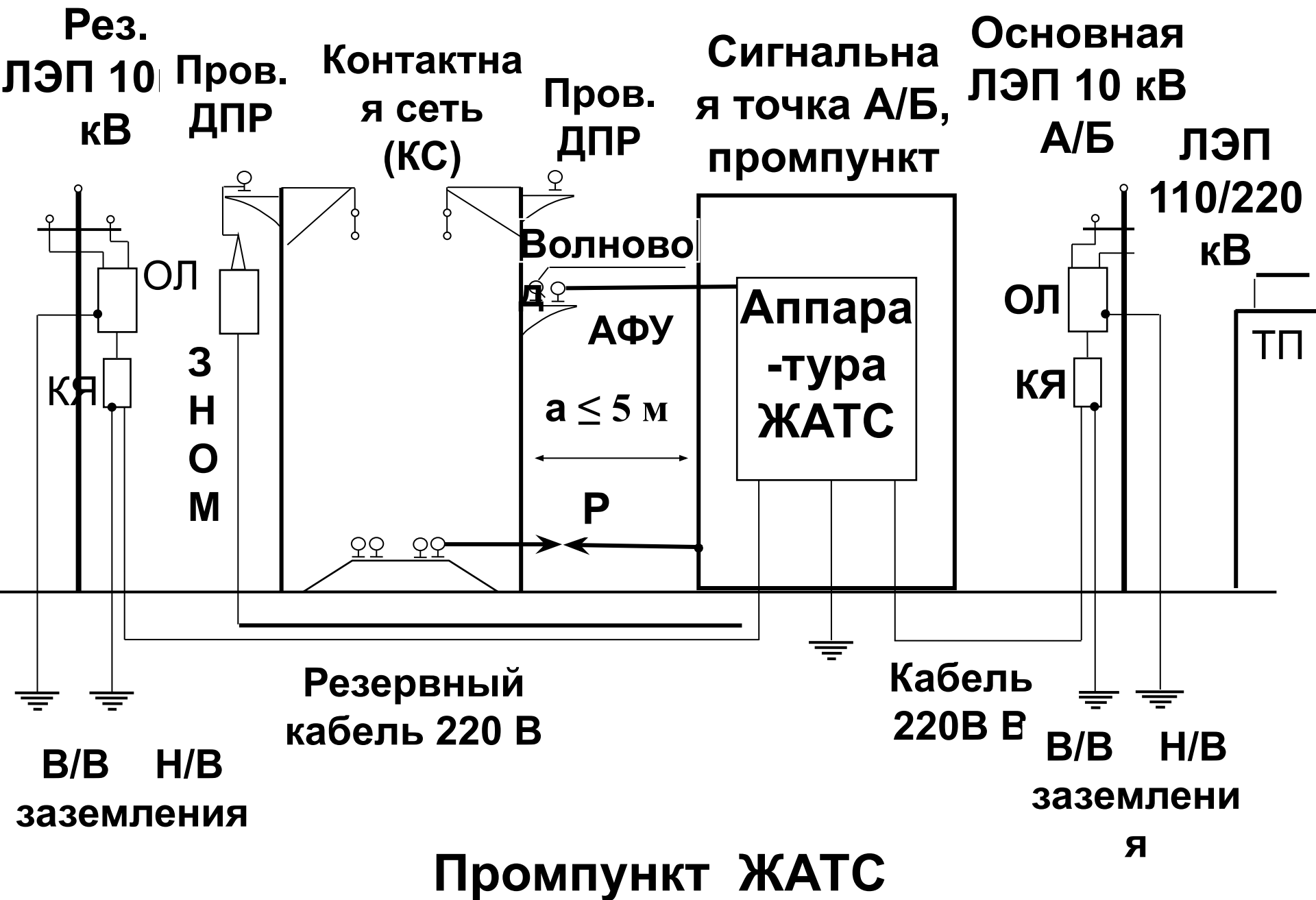
-

- [ETS 300331](#)* [ETS 300641](#) Испытания радиоаппаратуры
-
- **ЕЭК (евразийское экономическое сообщество)**
- **Технический регламент Таможенного союза (ТР ТС 020/2011) 9.12.2011г.
Приказ №879 «Электромагнитная совместимость технических средств»
Вступил в силу с 15 феврал**

- Описание участков жел.дороги:
- **Полоса отвода - до 50 м от оси пути по обе стороны железной дороги**
- **объекты путевого хозяйства –** полотно ж.дороги с подушкой в виде геотекстиля или полипропилена под рельсами, шпалы, рельсы Р-65,Р-75 весом 65,75 кг/м
- **объекты ЖАТС вблизи путей –** **объекты ШЧ и РЦС -** сигн.точки А/Б, посты ЭЦ, пункты ПОНАБ, питающие цепи 220 В, АФУ, волноводы радиостанций, кабели связи и автоматики.

- **объекты энергослужбы (ЭЧ)** – на участках с электротягой постоянного тока – две ЛЭП-10кВ, выходящих от тяговых подстанций (ТП), и служащих для питания линейных устройств ЖАТС от понижающих напряжение трансформаторов типа ОМ или ОЛ, контактная сеть 3,3 кВ, питаемая от ТП, посты секционирования контактной сети (ПСКЦ), наконец сами ТП, расположенные друг от друга на расстоянии 10-25 км и питаемые от ЛЭП 110/220 кВ,

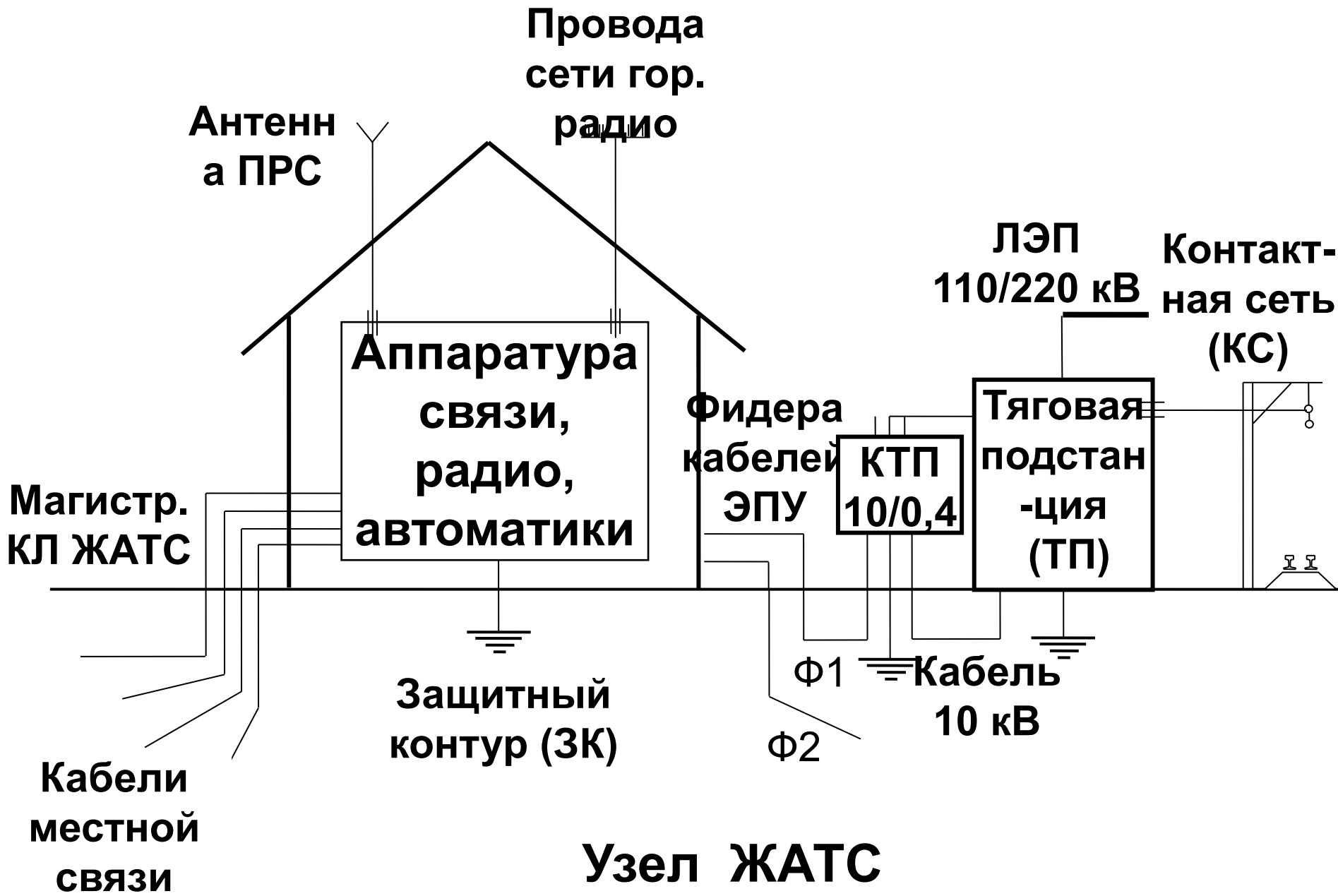
- **Объекты энергослужбы (ЭЧ)** – на участках с электротягой переменного тока тока - ЛЭП-10кВ и резервная цепь ДПР, служащие для питания линейных устройств ЖАТС от понижающих напряжение трансформаторов (ОЛ или ЗНОМ), контактная сеть 27,5 кВ, питаемая от ТП, посты секционирования контактной сети, наконец сами ТП, расположенные друг от друга на расстоянии 40-60 км и питаемые от ЛЭП 110/220 кВ, проходящих на расстоянии более 300 м от железной дороги.



- Корпуса всех объектов, расположенных на расстоянии менее 5 м от рельс, должны быть гальванически или через разрядники Р соединены с рельсами для надежного отключения с ТП провода контактной сети, под напряжением оборвавшегося и попавшего на эти корпуса.

- .

- **объекты ЖАТС, расположенные вне полосы отвода** – аппаратура в зданиях ВЦ, ШЧ, РЦС, магистральные и местные сети связи и электропитания 220/380 В, АФУ радио и телевидения, объекты вспомогательных служб
- **объекты энергослужбы (ЭЧ)** – сети электропитания 0,4/10 кВ, КТП, ТП.



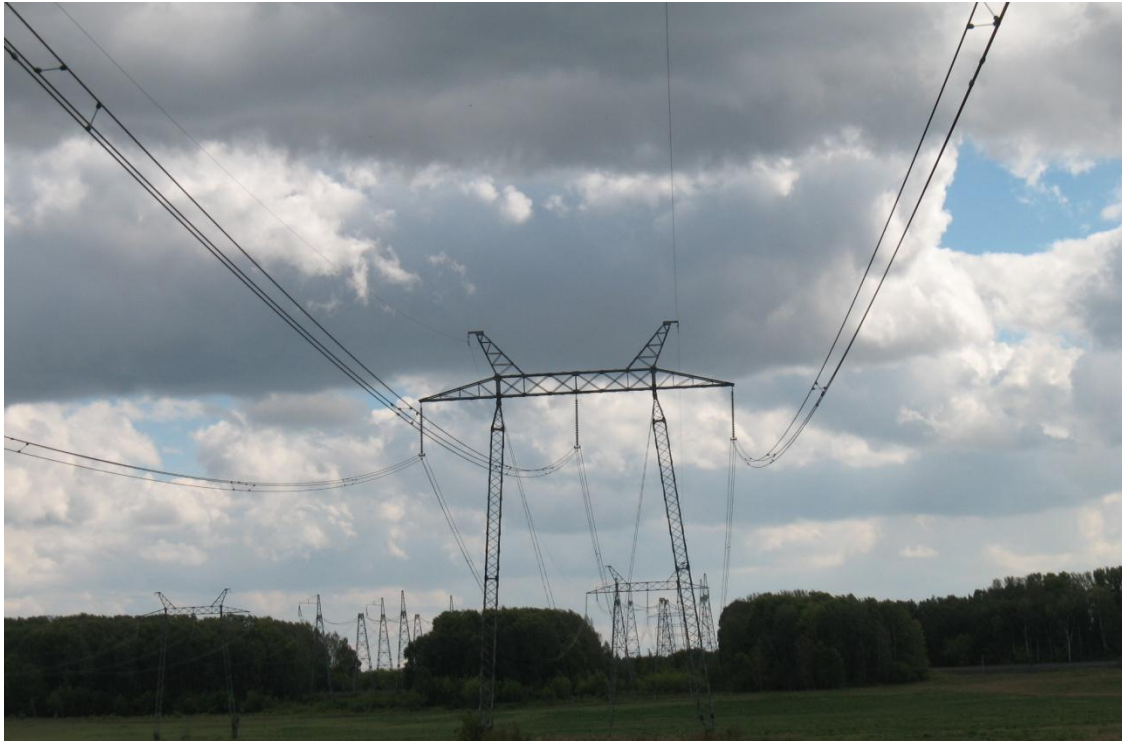
- Источники опасных и мешающих воздействий:

- линии электропередач ЛЭП,
- контактная сеть железных дорог,
- молния,
- радиолокационные станции,
- радиопередающие станции,
- сотовая связь,
- промышленное оборудование, ВЧ, СВЧ
- внутрисистемные помехи.

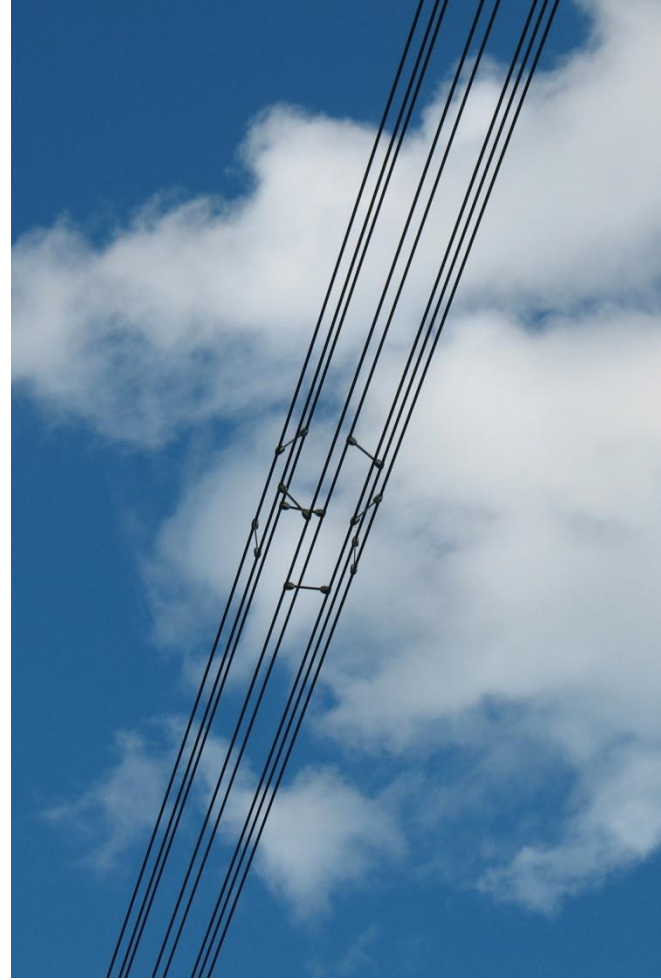
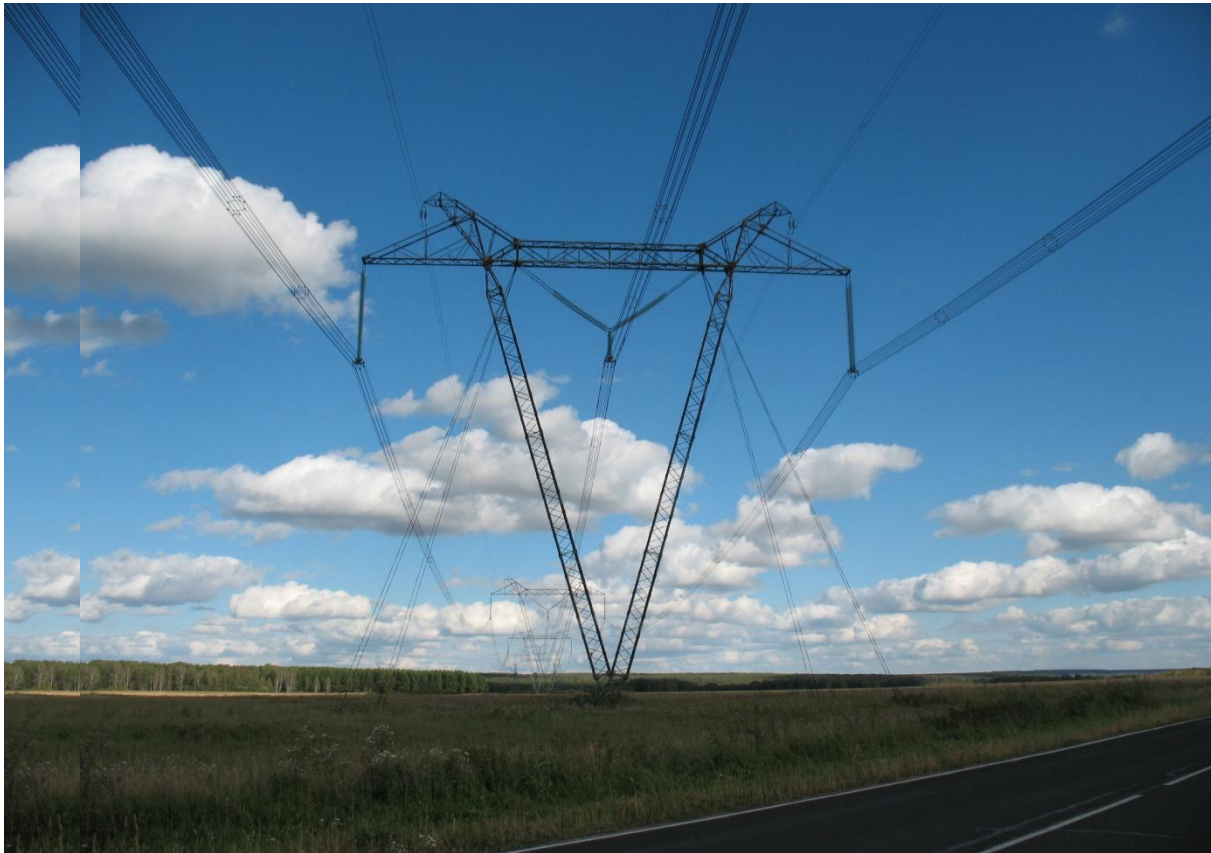
- Линейные напряжения линий электропередач
- ЛЭП - 50, 500, 220, 110 кВ -3 фазные
- –с заземленной нейтралью

- ЛЭП -6, 10, 35 кВ – 3 фазные с изолированной нейтралью

- Число изоляторов -1, 2, 3, ...11,.....



ВЛ 500 кВ и фаза из 3х проводов



ВЛ 1150 кВ и фаза из 8ми проводов

В моменты нарастания тока КЗ ЛЭП постоянного тока он изменяется по экспоненциальному закону

- $$i(t) = I_{\text{нач}} + I_{\text{кз}} (1 - \exp(-t/\tau)),$$

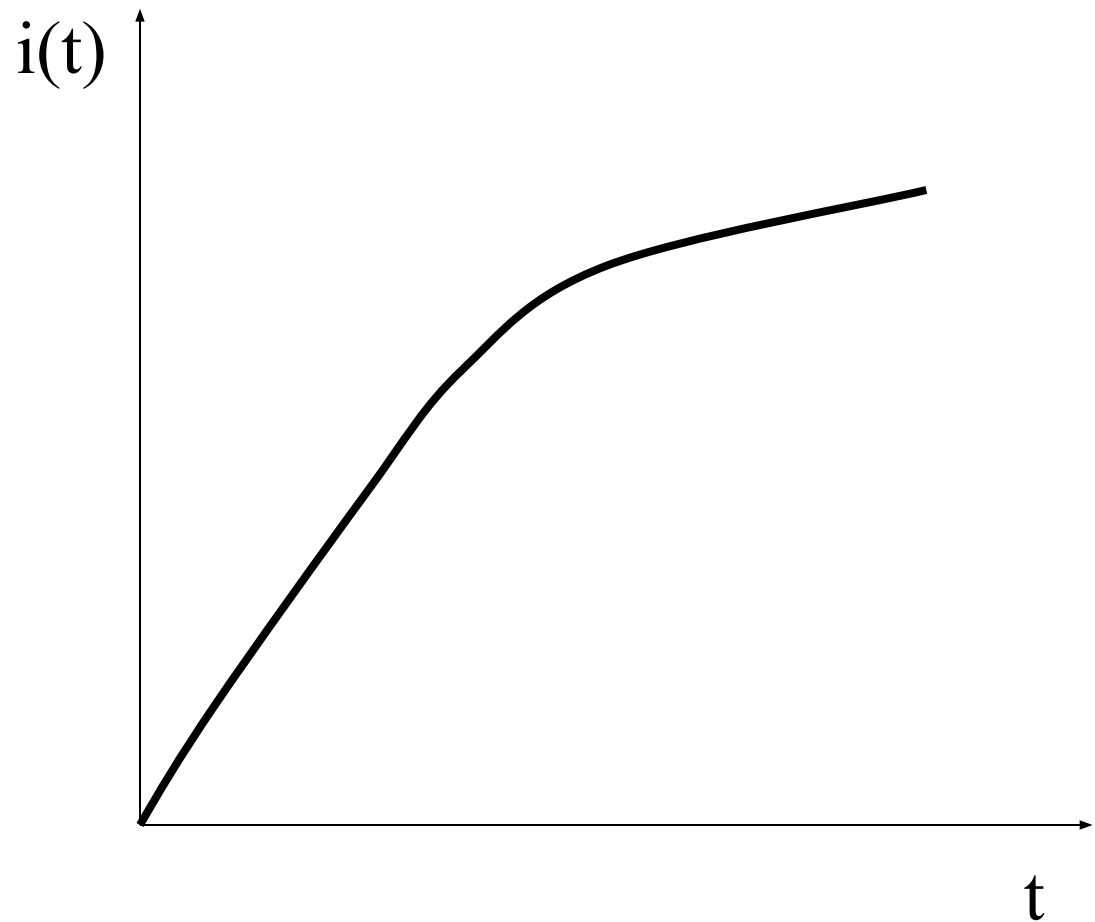
где $I_{\text{нач}}$ – ток до начала КЗ;

- $I_{\text{кз}}$ – амплитуда тока КЗ;

- $\tau = L/R$ – постоянная времени цепи КЗ, мс.

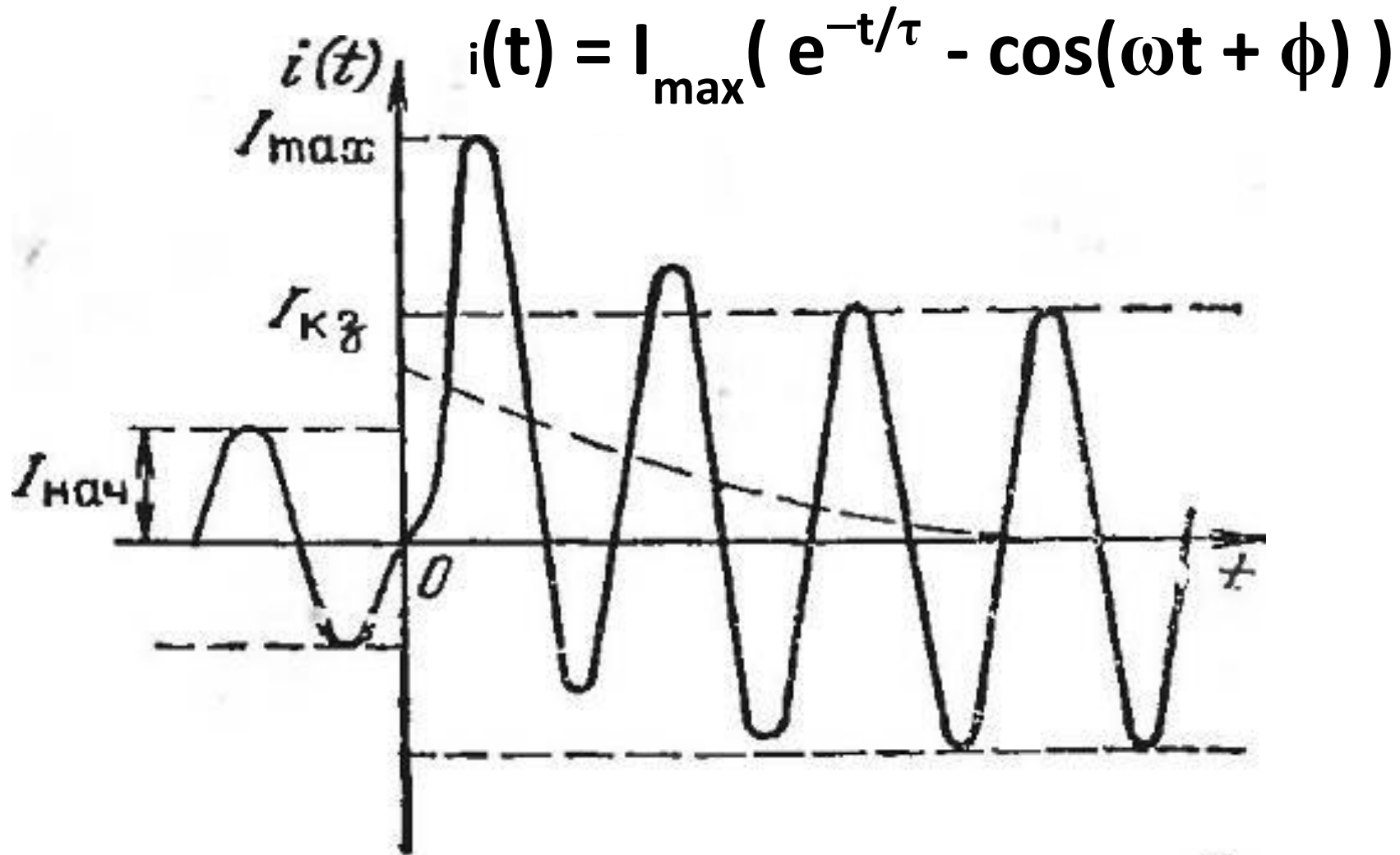
-

-



Короткое замыкание в цепи ЛЭП
постоянного тока

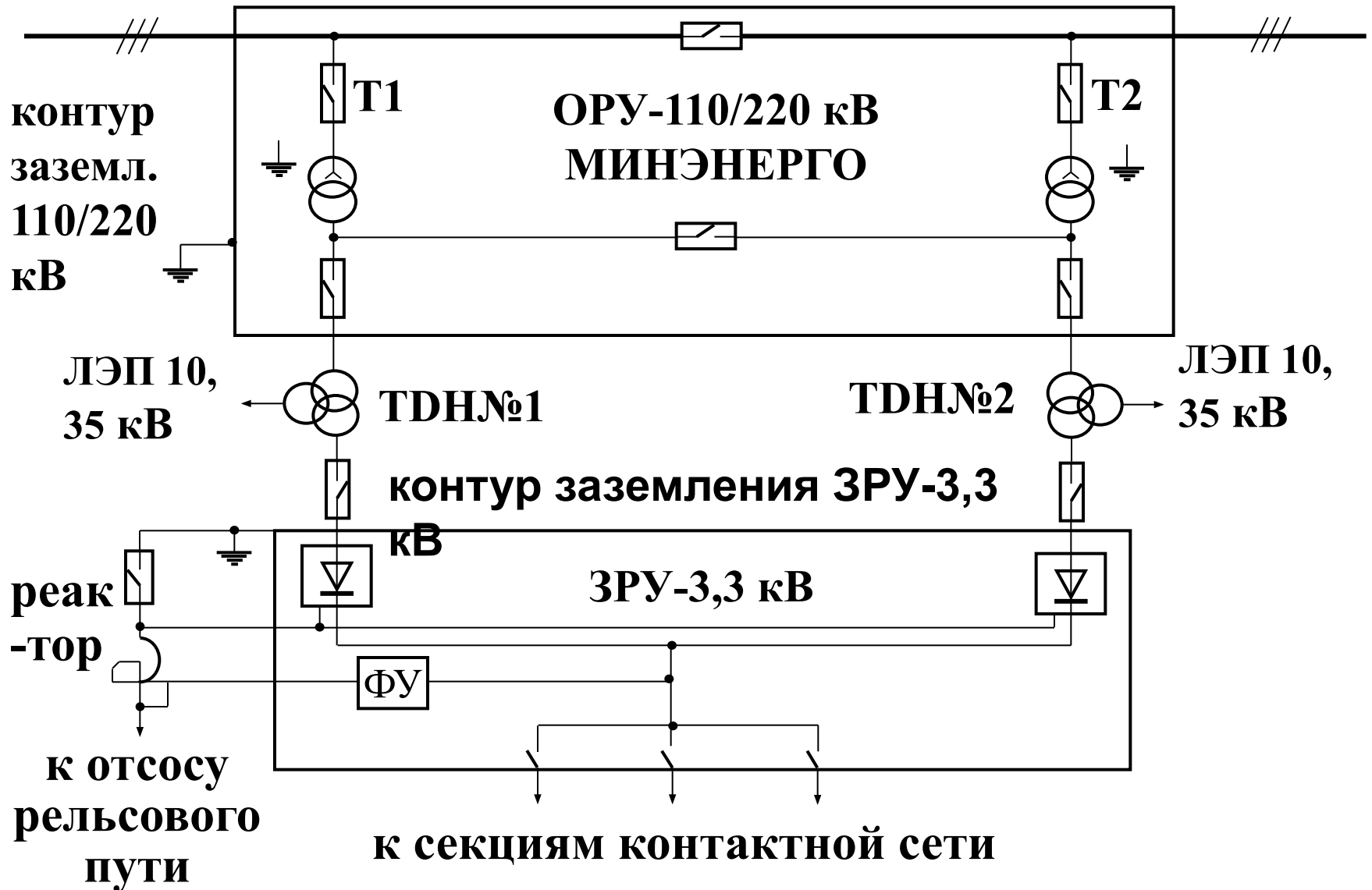
ток однофазного КЗ ЛЭП переменного тока



Максимальные значения токов КЗ ЛЭП

| | | | |
|--|-----|-----|-----|
| Линейное напряжение, кВ | 110 | 220 | 500 |
| Максимальные мгновенные значения тока КЗ, кА | 95 | 109 | 79 |

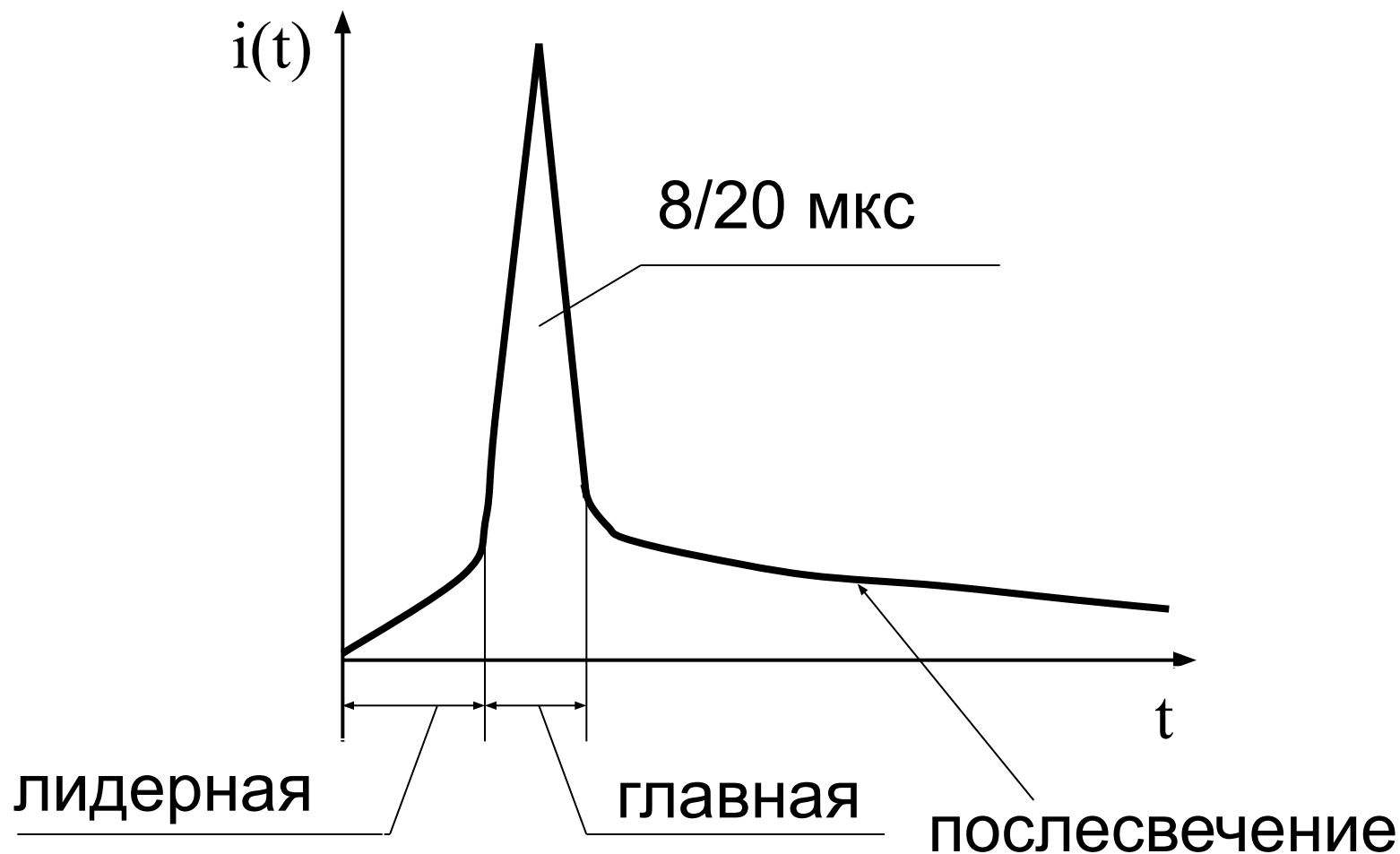
Схема (упрощенная) тяговой подстанции постоянного тока





к отсосу ТП, к групповому
заземлителю опор контактной
сети, к корпусам аппаратуры
ЖАТС

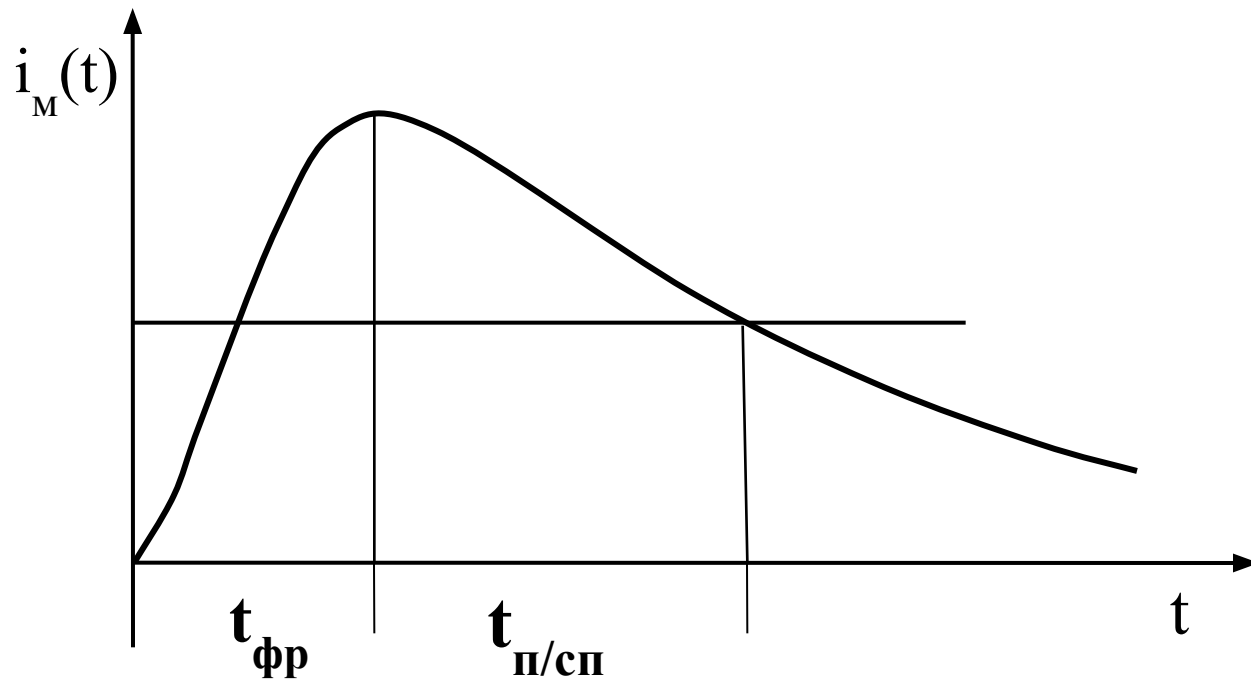
стадии грозового разряда

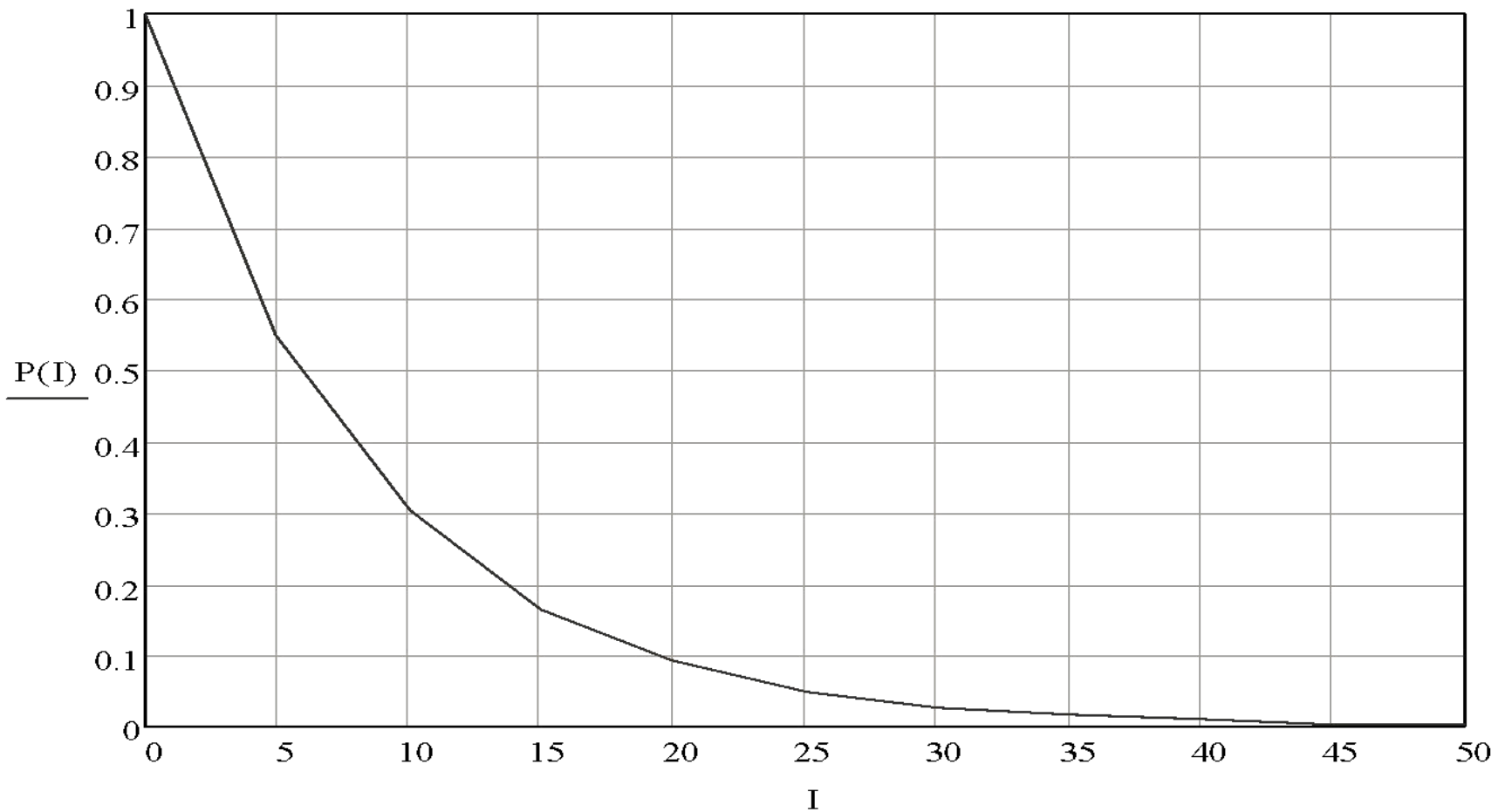


Главная стадия

МОЛНИИ

$$i_M(t) = I_{\max} (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2})$$

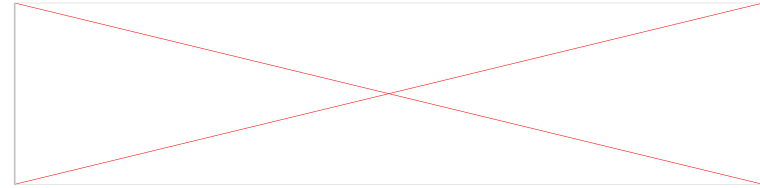
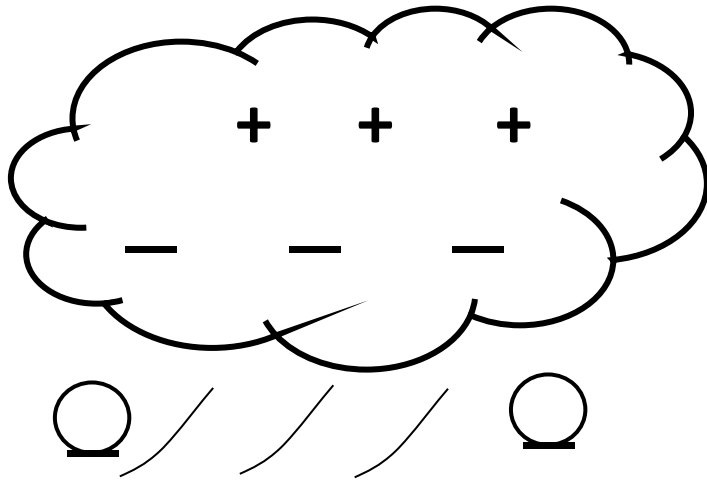




- График вероятности появления тока молнии
- с амплитудно-временными характеристиками
- $I_M = 20$ кА (2/50) мкс при крутизне нарастания
- фронта I_{mp}

**Вероятность появления тока
МОЛНИИ
с определенными параметрами**

| Максимальное значение тока молнии I, кА | Вероятность появления импульса тока с параметрами (2/50) мкс и уровнем тока I, P, % |
|---|---|
| 20 | 30 |
| 50 | 19 |
| 100 | 3 |
| 150 | 1 |
| 200 | 0,1 |



$$kM_{\max}^{\text{низ}} = 0,5 - 3$$

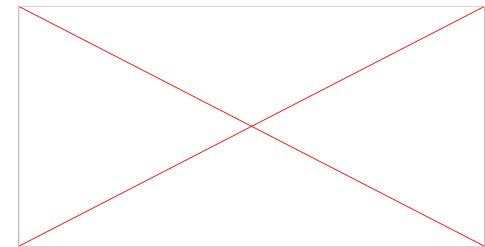
1) При $E \approx (25 - 30 \text{ кВ/см})$ – лидеры $d = 10 - 15 \text{ м}$
 $V = \text{сотни км/с}$, появление с земли стримеров

2) Главная стадия - Обратный разряд с земли

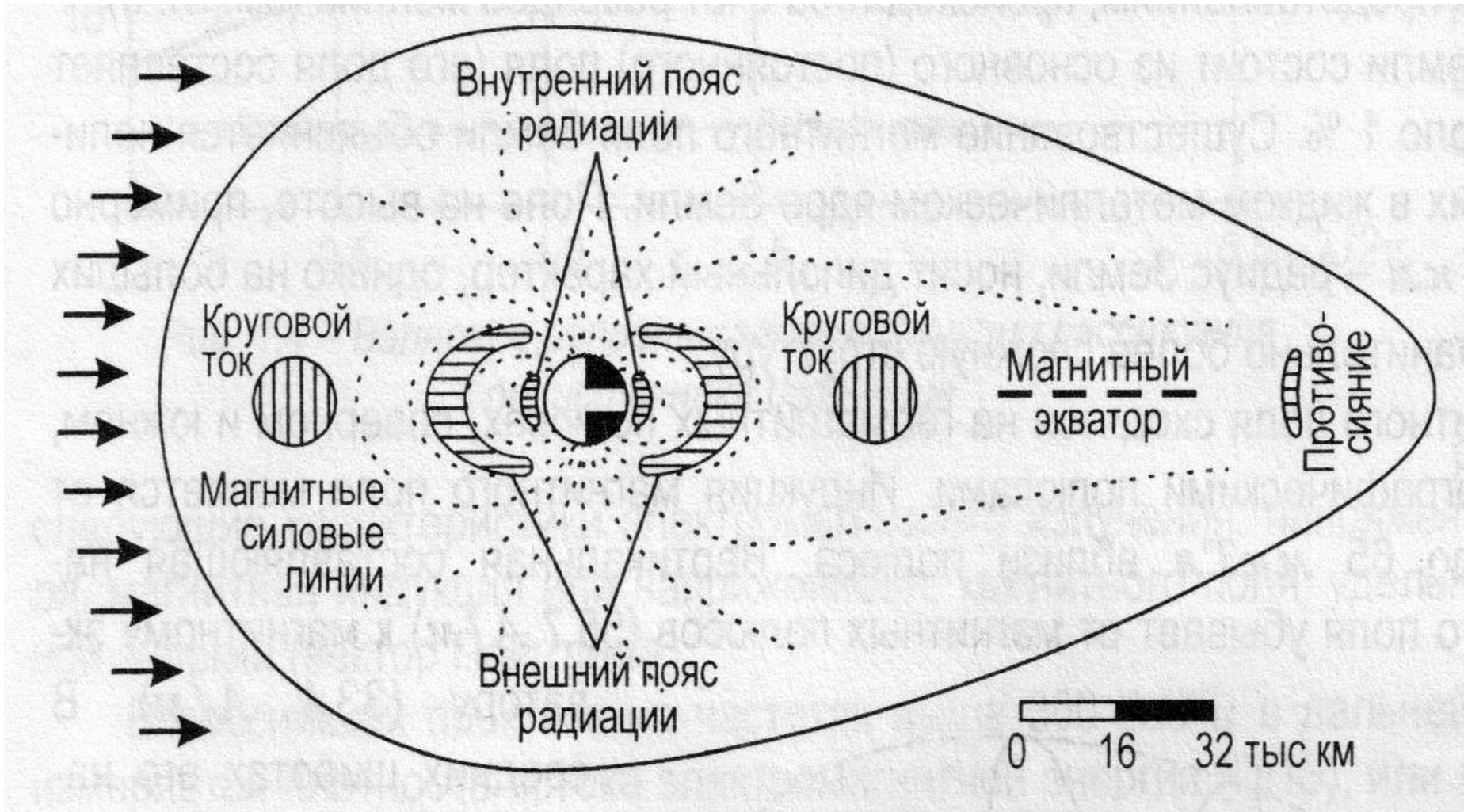
$$V_{\text{среза}} = 50000 \text{ км/с}$$

$$t = (20000 - 35000)^\circ\text{C}$$

3) Нейтрализация зарядов – до сотен мс



- Молния-видеозаписи



Траектория заряженных частиц
в магнитном поле Земли

• Природные источники Земли

- Постоянное электрич. поле у поверхн. $E_{\text{средн}} = 130 \text{ В/м}$,
- $E_{1,8\text{м}} = 200 \text{ В}$, $E_{\text{земли}} - E_0 \approx 400 \text{ кВ}$, $I_{\text{проводим}} = 1800 \text{ А}$
- Полный заряд земли $Q = 6 \times 10^5 \text{ Кл}$
- Геомагнитное поле $B = (35_{\text{Э}} \div 65_{\text{П}}) \text{ мкТл}$,
- $H_{\text{верт.}} = (35_{\text{Э}} \div 55_{\text{П}}) \text{ А/м}$, $H_{\text{гориз.}} = (1_{\text{П}} \div 30_{\text{Э}}) \text{ А/м}$
- 1 слой – высота (2-5) тыс.км, 2 слой – (12 – 20) тыс.км,
- 3 слой - круговой ток = 10^7 А – высота (50-60) тыс.км
- 3. Радиоволны космоса
- 10 МГц – 10 ГГц излучения потоком $10^{-10} - 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$
- Магнитные бури $f = 0,01-5 \text{ Гц}$ $B = 200-1000 \text{ нТл}$

Длина волны λ (м) = $300/F, \text{МГц}$,

- Обозначение нормы электромагнитных излучений
 - для электрической составляющей – $E, \text{В/м}$
 - Обозначение нормы электромагнитных излучений
 - для магнитной составляющей - $H, \text{А/м}; \text{В,Тл}$
 - $B = \mu_0 H$ ($1 \text{ А/м} \rightarrow 1,25 \text{ мкТл}$), при $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$
 - Для излучений диапазона **30 кГц-300 МГц** введены понятия - энергетические экспозиции
 - электрической составляющей поля – $\text{ЭЭ}_E = E^2 \times T, (\text{В/м})^2 \times \text{ч}$,
 - магнитной составляющей поля - $\text{ЭЭ}_H = H^2 \times T, (\text{А/м})^2 \times \text{ч}$,
 - Для СВЧ диапазона (**300 МГц-300 ГГц**) вводят понятие – плотность потока энергии – **ППЭ, мкВт/см²**
- ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ.ЭКСПОЗИЦИЯ**

$$\text{ЭЭ}_{\text{ппэ}} = \text{ППЭ} \times T, (\text{мкВт/см}^2) \times \text{ч}$$

Нормы электромагнитного излучения бытовых приборов, мкТл, в частотном диапазоне 30-400 Гц при ПДУ=2 мкТл

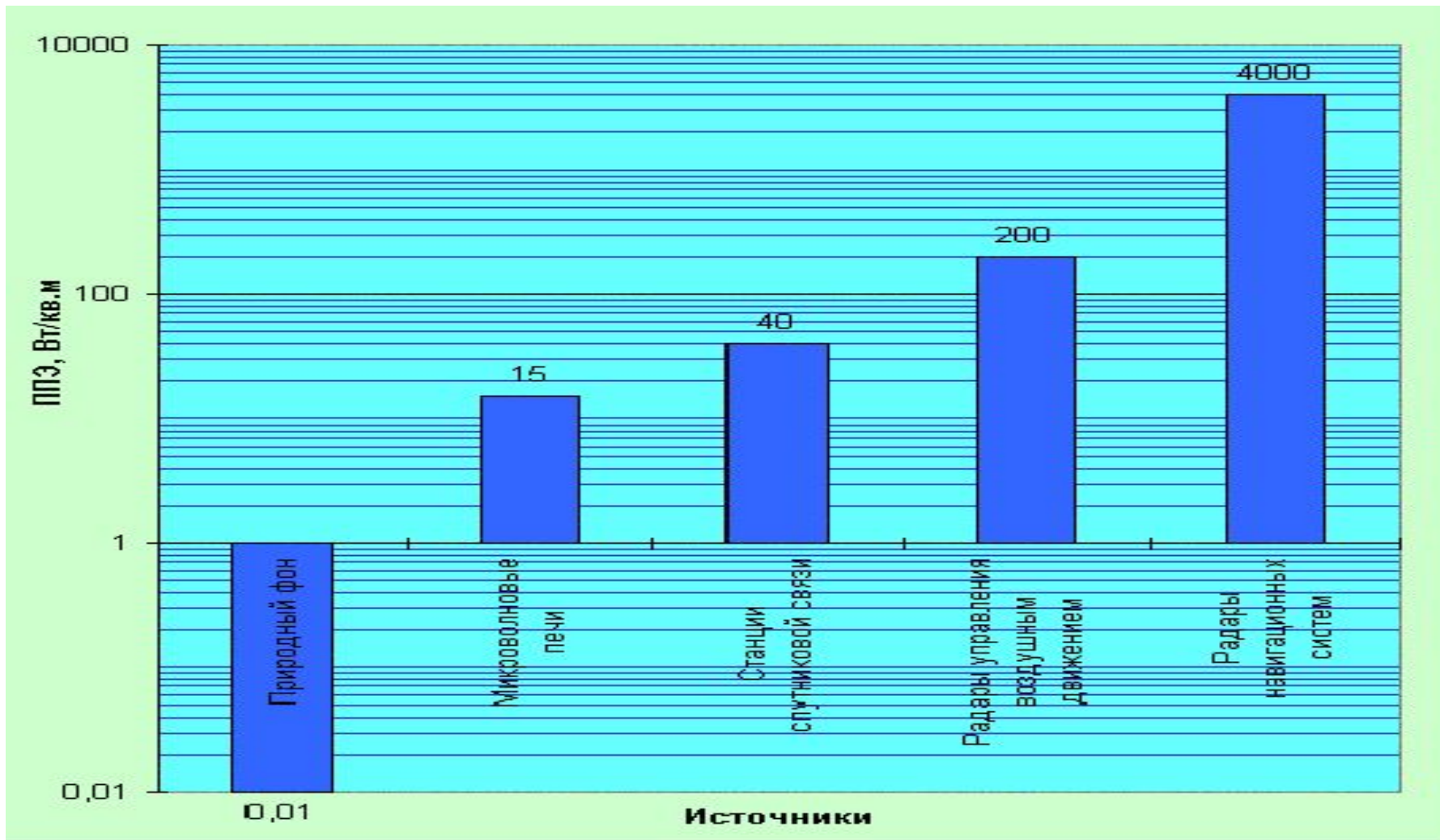
| Электрооборудование | Расстояние | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Нормы излучения на 30 мм | Нормы излучения на 0,3 м |
| Телевизоры | 2,5 – 80 | 0,04 – 2 |
| Микроволн. печь | 73 – 200 | 4 – 8 |
| Фен | 6 – 2000 | 0,01 – 7 |
| Холодильник | 0,5 – 1,7 | 0,01 – 0,25 |
| Бритва | 15 – 1500 | 0,08 – 9 |
| Компьютер | 0,5 – 30 | ÷ 0,01 |
| Пылесос | 200 – 800 | 0,5 – 30 |
| Настольная лампа | 40 – 400 | 0,5 – 2 |

Границы санитарно-защитных зон для ЛЭП в городе при $B \leq 0,2 \text{ мкТл}$

| | | | | | | | |
|--|----------------------|--------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------|
| Напряжени е ЛЭП | <20 кВ | 35 кВ | 110 кВ | 150 -220 кВ | 330 - 500 кВ | 750 кВ | 1150 кВ |
| Размер санитарно- защитной зоны | 10 м | 15 м | 20 м | 25 м | 30 м | 40 м | 55 м |

Предельные значения напряженности электр. поля E или потока мощности P , создаваемые РПС и РЛС на расстоянии 1 км

| № п/п | Виды источников | $E, P_{\text{изл}}$ |
|----------|--------------------------------------|------------------------|
| 1 | КВ–стационар. радиостанции до 30 МГц | 45 В/м |
| 2 | Телевизионные станции на 1 МВт | 15 В/м |
| 3 | Сотовые станции GSM | (20÷40) В/м |
| 4 | Метео РЛС (0,5÷15) ГГц, до 300 ГГц | 100 Вт/м ² |
| 5 | РЛС самолета СУ-35С при 400 мкс | 20МВт/м ² |
| 6 | РЛС самолета F22 - “ – “ - | 40МВт/м ² |
| 7 | Корабельные РЛС на (2÷10) кВт | 2,5 МВт/м ² |



Уровни ЭМИ-радаров в сравнении с другими источниками СВЧ-диапазона

| Диапазоны частот | Предельно допустимые значения энергетической экспозиции | | |
|-------------------|---|--|---|
| | по электрической составляющей, (В/м) ² ×ч | По магнитной составляющей, (А/м) ² ×ч | По плотности потока энергии (мкВт/см ²)×ч |
| 30 кГц - 3 МГц | 20000,0 | 200,0 | - |
| 3 - 30 МГц | 7000,0 | Не разработаны | - |
| 30 - 50 МГц | 800,0 | 0,72 | - |
| 50 - 300 МГц | 800,0 | Не разработаны | - |
| 300 МГц - 300 ГГц | - | - | 200,0 |

Предельно допустимые уровни плотности потока энергии в диапазоне частот 300 МГц - 300 ГГц в зависимости от продолжительности воздействия

| Продолжительность воздействия T, ч | ППЭпду , мкВт/см² |
|---|-------------------------------------|
| 8,0 и более | 25 |
| 5,0 | 40 |
| 1,0 | 200 |
| 0,5 | 400 |
| 0,25 | 800 |
| 0,20 и менее | 1000 |

Для случаев облучения лиц от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования, с частотой не более 1 Гц и скважностью не менее 20, предельно допустимая интенсивность воздействия определяется по формуле:

$$I_{\text{пду}} = \frac{E_{\text{плэд}}}{K},$$

K - коэффициент ослабления биологической активности прерывистых воздействий, равный 10. Независимо от продолжительности воздействия интенсивность воздействия не должна превышать максимального значения - 1000 мкВт/см².

Нормы электромагнитных излучений для населения

| № п/п | Диапазон частот | E, В/м | H, А/м | ППЭ, мкВт/см ² | Источники излучения |
|--------------------|-------------------------|--------|--------|------------------------------|------------------------|
| 1 | (0=30) Гц | = | = | = | Трансп. |
| Место для формулы. | | | | | |
| 2 | 50 Гц | 500 | 50 | - | Тр., ЛЭП |
| 3 | (0,3 - 300) кГц | 25 | | - | РПС-ДВ |
| 4 | (0,3 - 3) МГц | 15 | | - | РПС-СВ |
| 5 | (3 - 30) МГц | 10 | | - | РПС-КВ |
| 6 | (30- 300) МГц | 3 | 3 | - | УКВ, ТВ |
| 7 | 300 МГц - 300 ГГц (СВЧ) | - | - | 10 | РРЛ, РЛС |

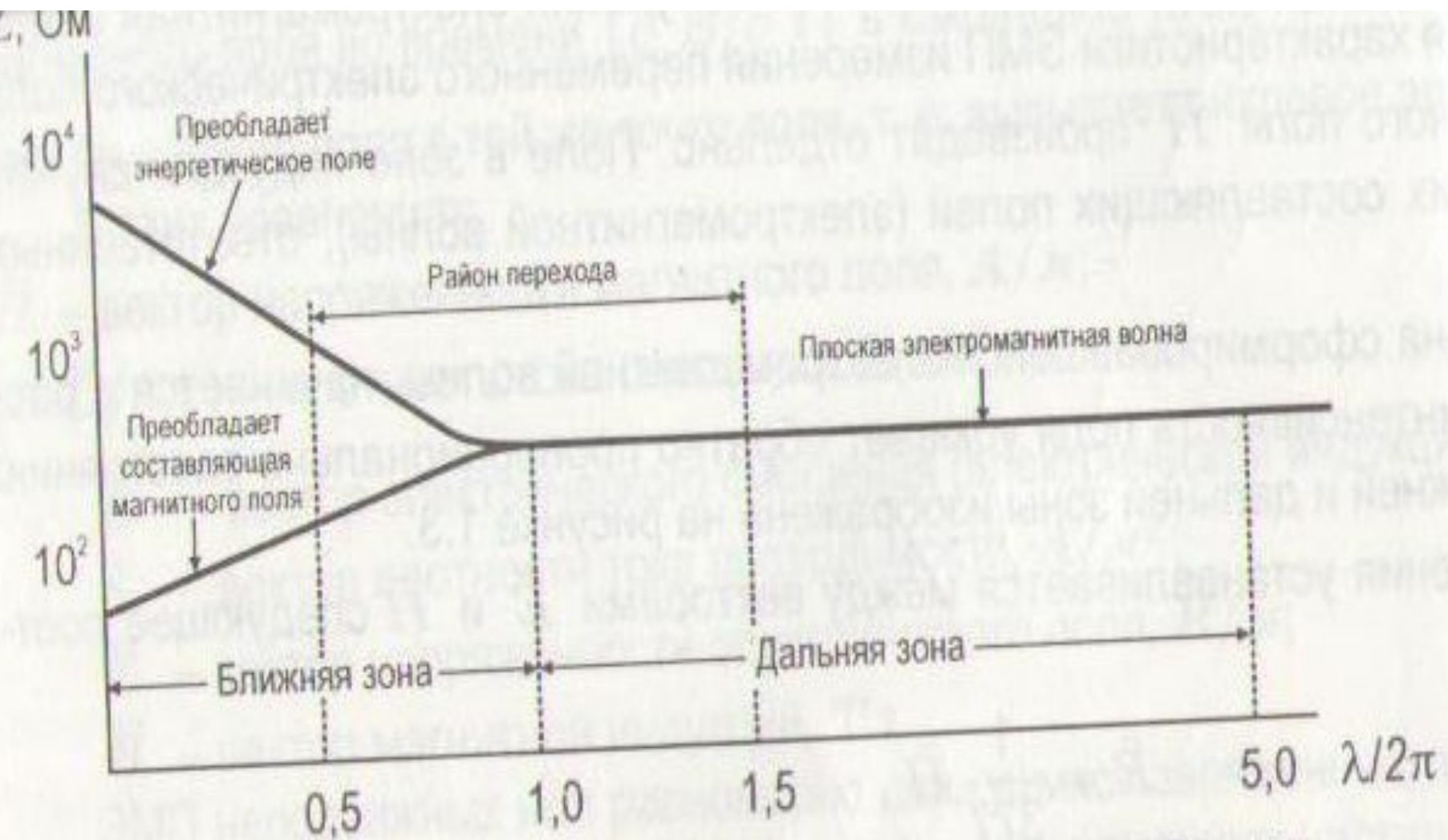


Рис. 1.4 – Волновое сопротивление в функции расстояния от источника излучения

- Изменение электрического поля в ближней зоне $E \sim 1/r^3$
-
- Изменение магнитного поля в ближней зоне $H \sim 1/r^2$
-
- Изменение электромагнитного поля в дальней зоне $P \sim 1/r$
-

- ВОЛНОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СФОРМИРОВАВШЕЙСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ ИЗЛУЧЕНИЙ

- $$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{1 / (4\pi \cdot 10^{-7} \cdot c^2)}} = 120\pi = 377$$

- Граница между дальней и ближней зонами излучений определяется отношением

$$\lambda/2\pi = r$$

- Волновое сопротивление электрического поля вибратора в ближней зоне

$$Z_E = \frac{E}{H} = Z_0 \frac{\lambda}{2\pi r}$$

- Волновое сопротивление магнитного поля рамки в ближней зоне

$$Z_H = \frac{E}{H} = Z_0 \frac{2\pi r}{\lambda}$$

Законы электродинамики в интегральной форме

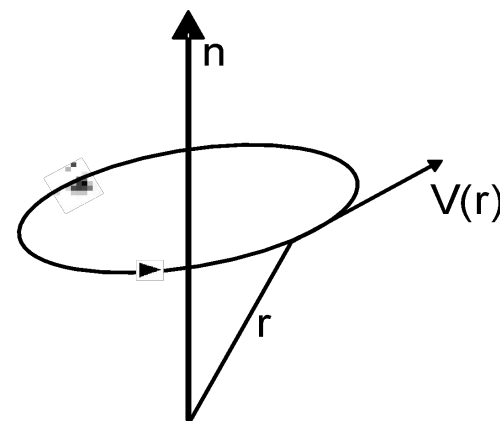
$\oint H dl = I$ - линейный интеграл напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру равен полному току, проходящему сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

$\oint E dl = -\frac{d\Phi}{dt}$ - электродвижущая сила, возникающая в контуре при изменении магнитного потока Φ , проходящего сквозь поверхность, ограниченную контуром, равна скорости изменения этого потока с обратным знаком.

В дифференциальной форме

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \sigma \vec{E} + j\omega \varepsilon_a \vec{E}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu_a \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -j\omega \mu_a \vec{H}$$



$$\operatorname{div} \vec{E} = \rho$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0$$

ГДЕ

σ – проводимость, См/м

ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м

μ_a – магнитная проницаемость среды, Гн/м

$$\sigma \vec{E} = I_{\text{ПР}}$$

- - ток проводимости (ток в металлических массах)

$$j\omega \varepsilon_a \vec{E} = I_{\text{СМ}} \text{ ток смещения (ток в диэлектрике)}$$

Уравнения Максвелла

| Левая часть | Правая часть | | Режим передачи |
|---------------|-------------------------|--------------------------------|---|
| | Металл | Диэлектрик | |
| $rot \dot{H}$ | 0 | 0 | Статический |
| $rot \dot{E}$ | 0 | 0 | |
| $rot \dot{H}$ | $\sigma \dot{E}$ | 0 | Стационарный |
| $rot \dot{E}$ | 0 | 0 | |
| $rot \dot{H}$ | σE | 0 | Квазистационарный ВЛ, СК, КК, до 1 ГГц |
| $rot \dot{E}$ | $-j\omega\mu_0 H$ | $-j\omega\mu_0 H$ | |
| $rot \dot{H}$ | 0 | $j\omega\varepsilon_0 \dot{E}$ | Волновой и квазиоптический Радиотехника и лазерная техника |
| $rot \dot{E}$ | 0 | $-j\omega\mu_0 H$ | |
| $rot \dot{H}$ | σE | $j\omega\varepsilon_0 E$ | Электродинамический Волноводы, световоды, радиочастотные линии СВЧ ($f > 10^{10}$ Гц) $\lambda < D$ |
| $rot \dot{E}$ | $-j\omega\mu_0 \dot{H}$ | $-j\omega\mu_0 H$ | |

| Длина волны | Система связи | Токи | Тип направляющей системы | Частота |
|---------------|-------------------------------|----------|--------------------------|-------------------|
| $\lambda > D$ | Двухпроводная | $I_{пр}$ | СК, КК, ВЛ | $f < \frac{c}{D}$ |
| $\lambda < D$ | Однопроводная диэлектрическая | $I_{см}$ | В, ДВ, С, ЛПВ | $f > \frac{c}{D}$ |

Введем понятие комплексной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon'_a = \varepsilon_a \left[1 + \left(\frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_a} \right) \right] = \varepsilon_a (1 - jtg\delta),$$

где

$$tg\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_a}$$

δ – угол диэлектрических потерь.

Это позволяет записать первое и второе уравнения Максвелла в следующем виде

$$rot\dot{H} = j\omega\varepsilon'_a\dot{E}, \quad rot\dot{E} = -j\omega\mu_a\dot{H},$$

Возьмем от левой и правой части этих выражений дифференциальный оператор rot , получим

$$rotrot\dot{H} = j\omega\varepsilon'_a rot\dot{E}$$

Воспользуемся известным из математики соотношением

$$rotrot\dot{H} = graddiv\dot{H} - \nabla^2\dot{H}$$

И учитывая, что $div\dot{H} = 0$

Получим следующие уравнения, для продольных компонент электромагнитного поля E_Z и H_Z .

$$\nabla^2 E_Z + k^2 E_Z = 0; \quad \nabla^2 H_Z + k^2 H_Z = 0,$$

где

$$k = \omega\sqrt{\mu_a\varepsilon'_a} \text{ - волновое число среды}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \text{ - дифференциальный оператор Лапласа}$$

Поэтому полученные уравнения для E_Z и H_Z можно переписать в следующем виде

$$\frac{\partial^2 E_Z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_Z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_Z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 E_Z}{\partial Z^2} + k^2 E_Z = 0$$

$$\frac{\partial^2 H_Z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_Z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_Z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 H_Z}{\partial Z^2} + k^2 H_Z = 0$$

Остальные поперечные составляющие полей r и φ могут быть выражены через составляющие E_Z и H_Z непосредственно из уравнений Максвелла.

Энергетические соотношения в электромагнитном поле

Рассмотрим энергетический баланс энергии электромагнитного поля. Запас энергии в объеме V определяется суммой электрической и магнитной энергии:

$$W = \int_V \left(\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV$$

по аналогии с электротехникой

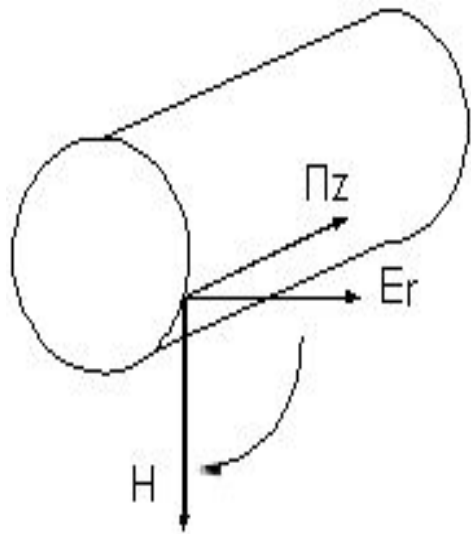
$$W = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = W_C + W_L$$

Используя уравнения Максвелла можно получить выражение

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV = \int_S [\dot{E}\dot{H}] dS + \int_S \sigma E^2 dV$$

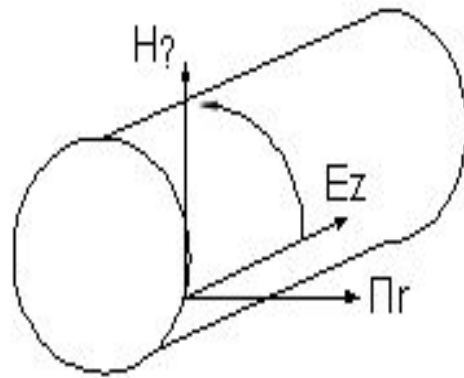
$\int_S [\dot{E}\dot{H}] dS$ - энергия излучения

$\int_S \sigma E^2 dV$ - энергия внутри объема преобразованного в тело



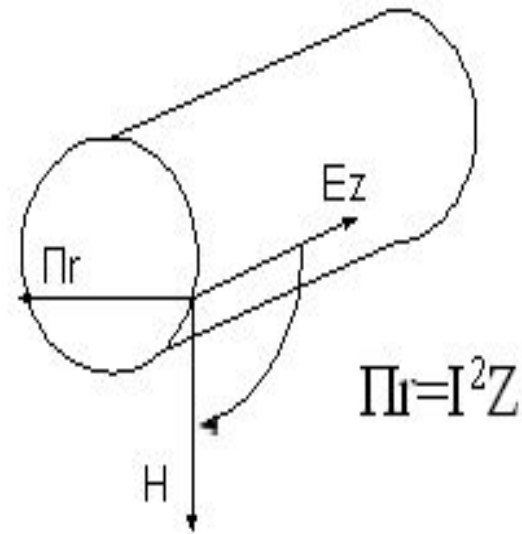
а) распространение

$$\Pi_z = \int_0^{2\pi} E_r H_\varphi r d\varphi$$



б) излучение

$$\Pi_r = \int_0^{2\pi} E_z H_\varphi^* r d\varphi$$



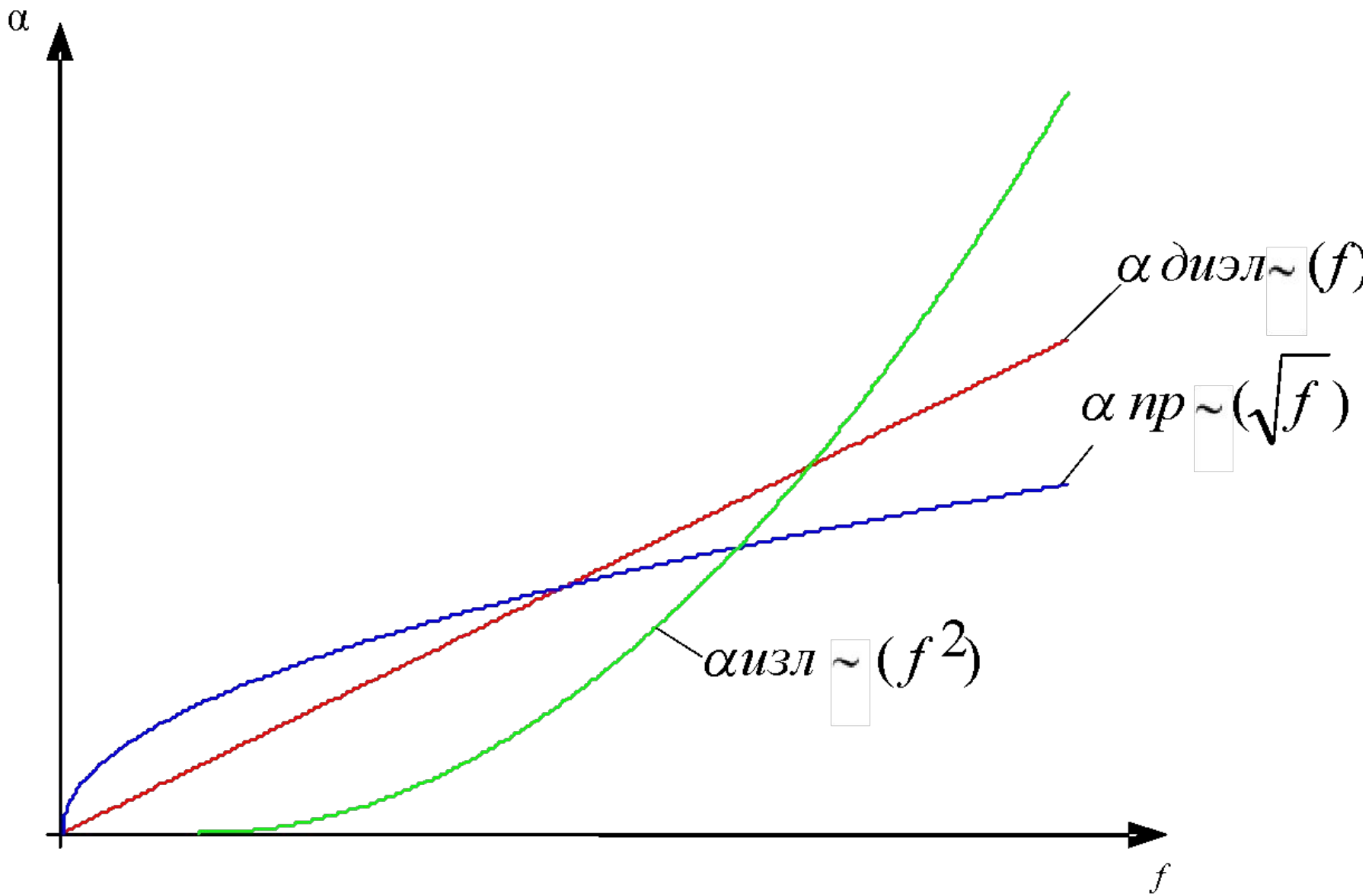
в) поглощение

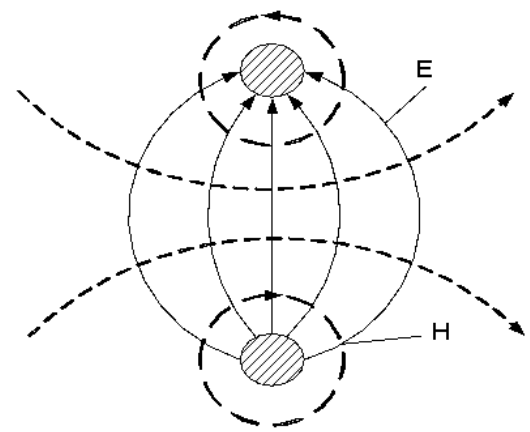
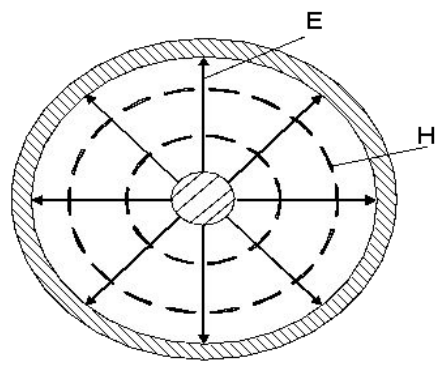
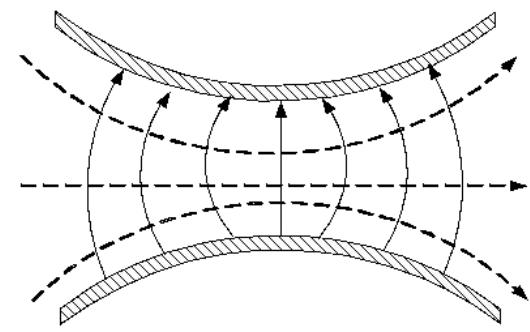
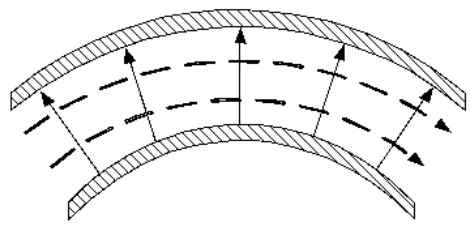
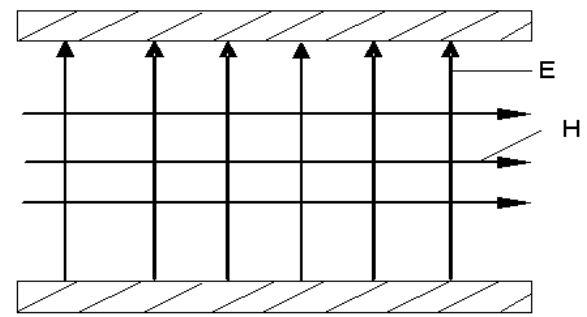
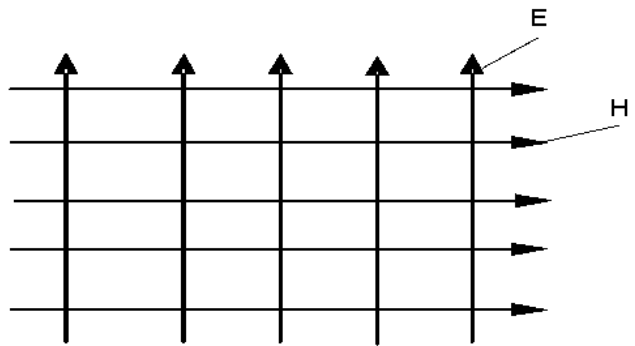
в) поглощение

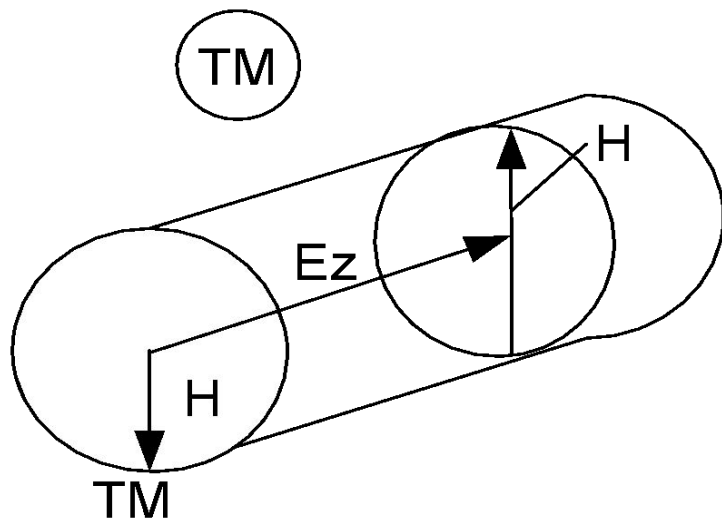
$$\Pi_r = \int_0^{2\pi} E_z H_\varphi r d\varphi =$$

$$Z = R + j\omega L = \frac{1}{I^2} \int_0^{2\pi} E_z H_\varphi r d\varphi$$

$$\Pi_r = I^2 Z$$





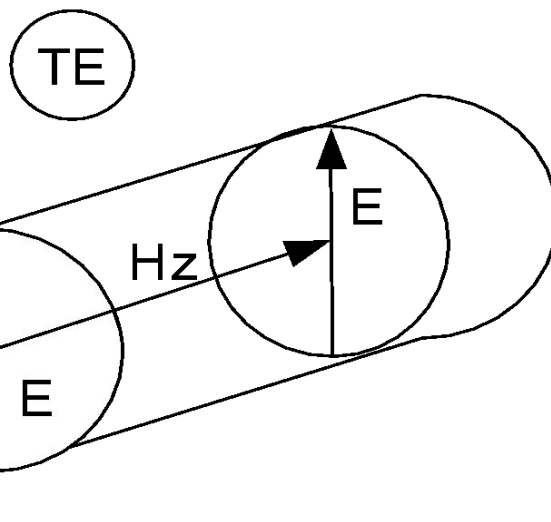


поперечно-магнитная и
электрическая

$$E_z \neq 0$$

$$H_z = 0$$

волны



поперечно-

$$E_z = 0$$

$$H_z \neq 0$$

Поперечно-электромагнитная волна **TEM** $E_z = 0$
(ВЛ, СК, коакс.) $H_z = 0$

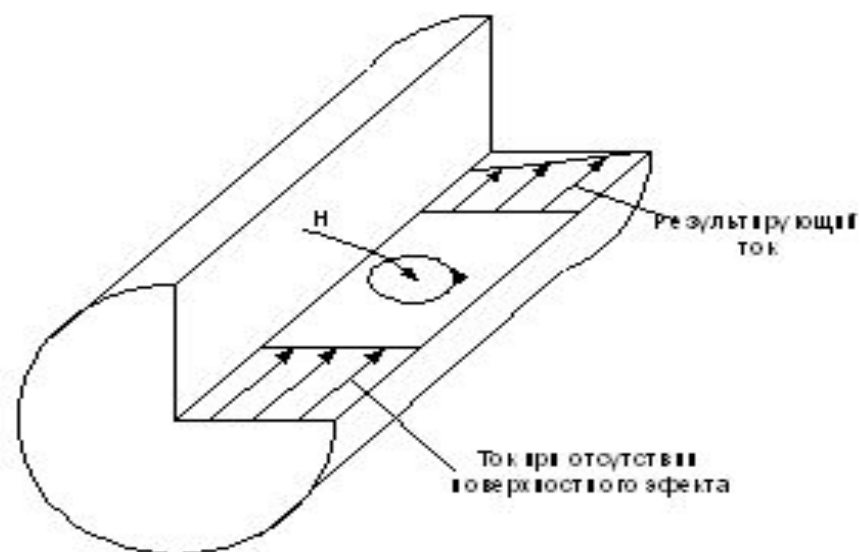
- Ближняя зона $r \leq \lambda/2\pi$
- ЭМ волна еще не сформирована,
- излучение отсутствует

- Эл. поле порождается потенциалом, напряжением, напряженностью
- Механизм передачи энергии – емкость

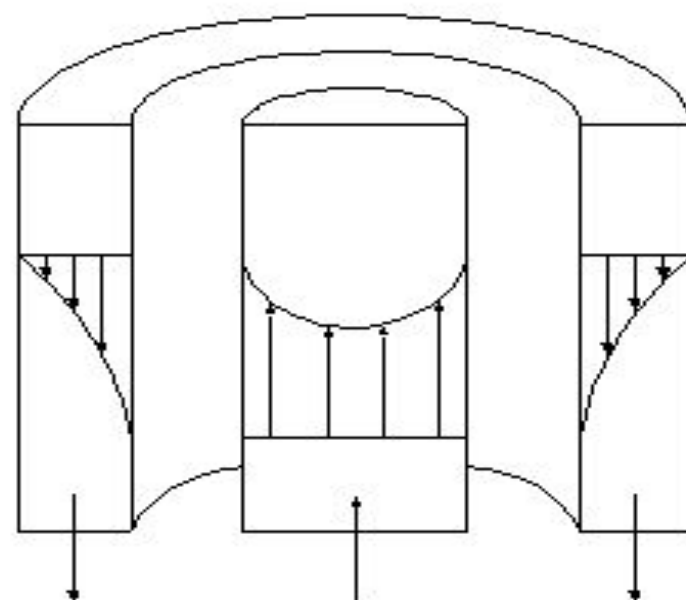
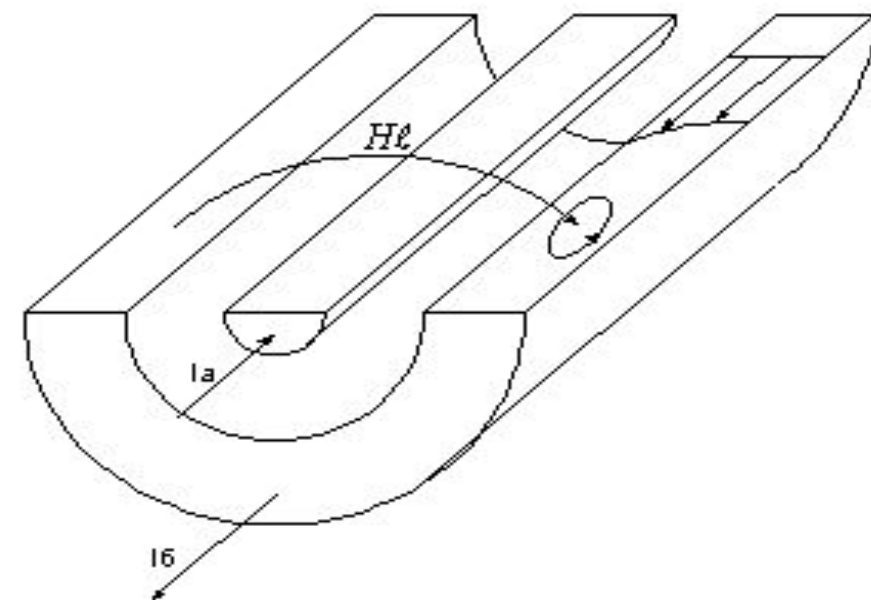
- Магнитное поле порождается током
Механизм передачи энергии -
взаимоиндукция

- Итак, нормы воздействия ЭМП на человека установлены.
- Эффективность элементарной защиты – удаление от источника,
- -- минимальное время нахождения в зоне действия поля, экспозиция.
- но не учтены:
- -- возможная модуляция энергии,
- -- воздействие на организм определенных излучений малой интенсивности

1. Поверхностный эффект заключается в вытеснении тока на наружную поверхность проводника за счет магнитного потока



2. Эффект близости

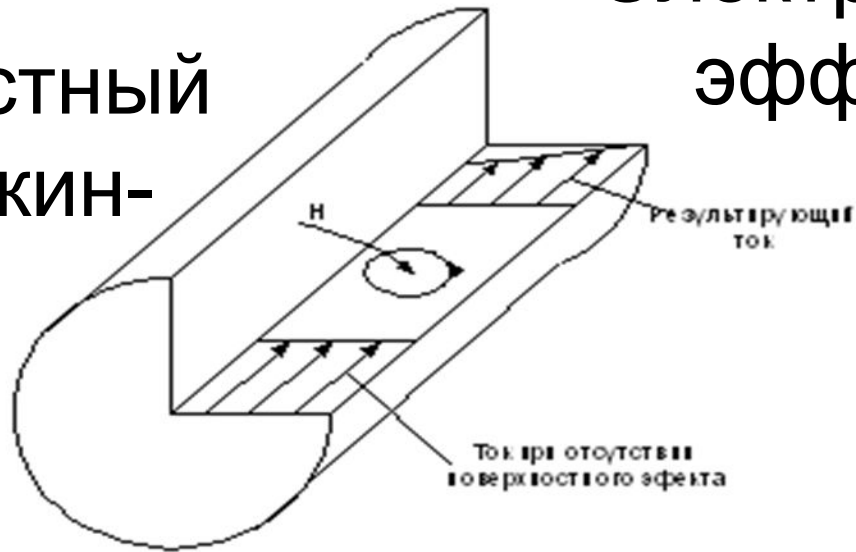


2. Эффект близости заключается в перераспределении тока в проводниках за счет взаимодействия магнитных полей и наведения вихревых токов в соседних проводниках.

1. Поверхностный эффект заключается в вытеснении тока на наружную поверхность проводника за счет магнитного потока

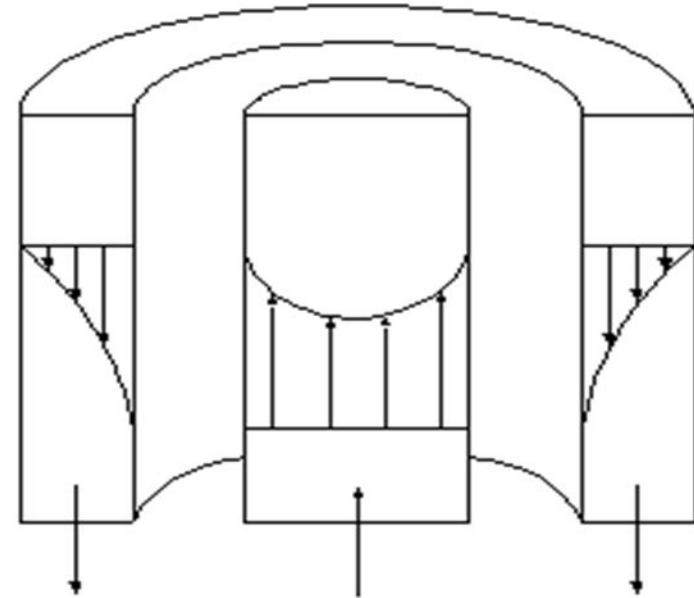
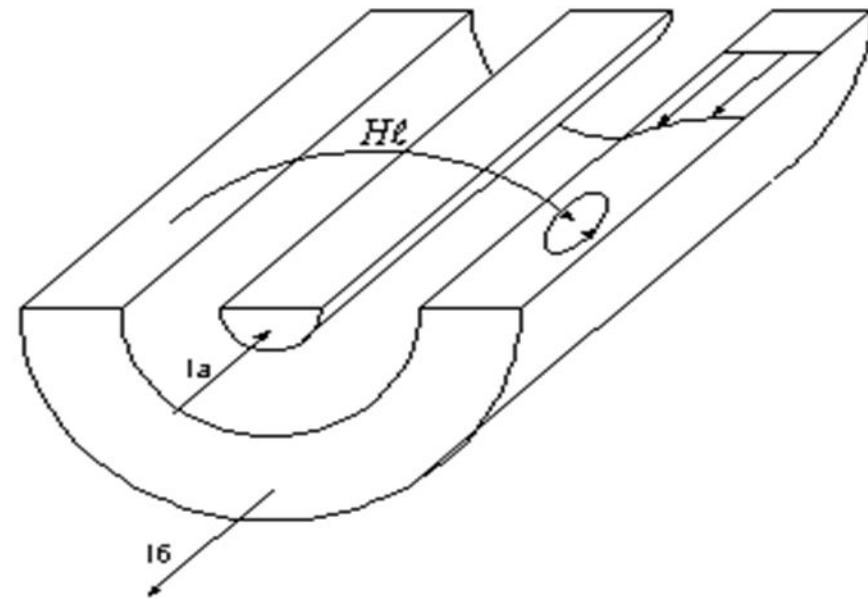
Электромагнитные эффекты

Поверхностный эффект (скин-эффект)



Эффект близости

2. Эффект близости



2. Эффект близости заключается в перераспределении тока в проводниках за счет взаимодействия магнитных полей и наведения вихревых токов в соседних проводниках.

- **Электротравматизм - непосредственное воздействие тока на человека**
- Этому подвержены среди электротехнического персонала:
 - ИТР -7,4%, рабочие специальн.- 38,4%
 - При выполнении работ
 - На ВЛС и КЛС -28,8%
 - Бытовые электротравмы-67,3%
- Ежегодно травмируется 20-30 человек на 1млн жителей России

• 1

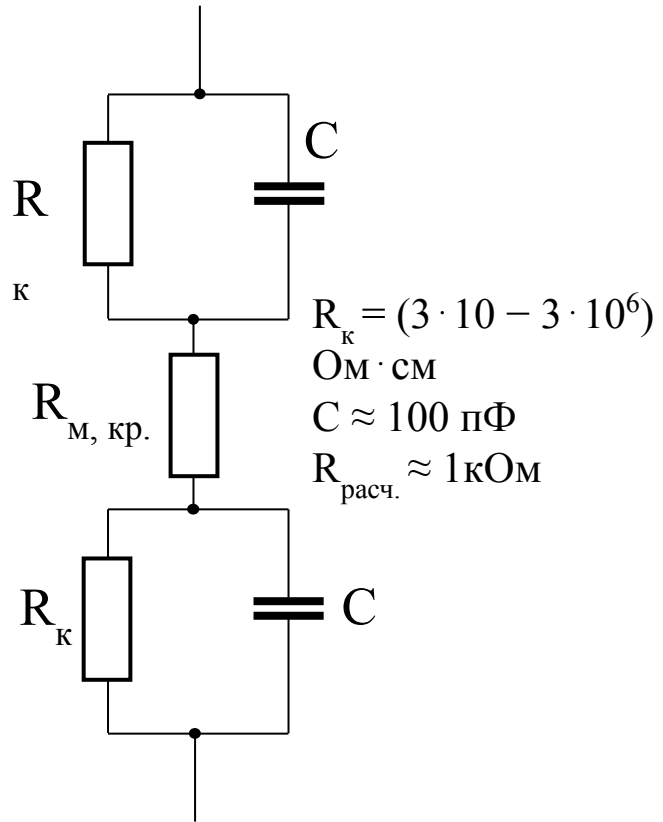
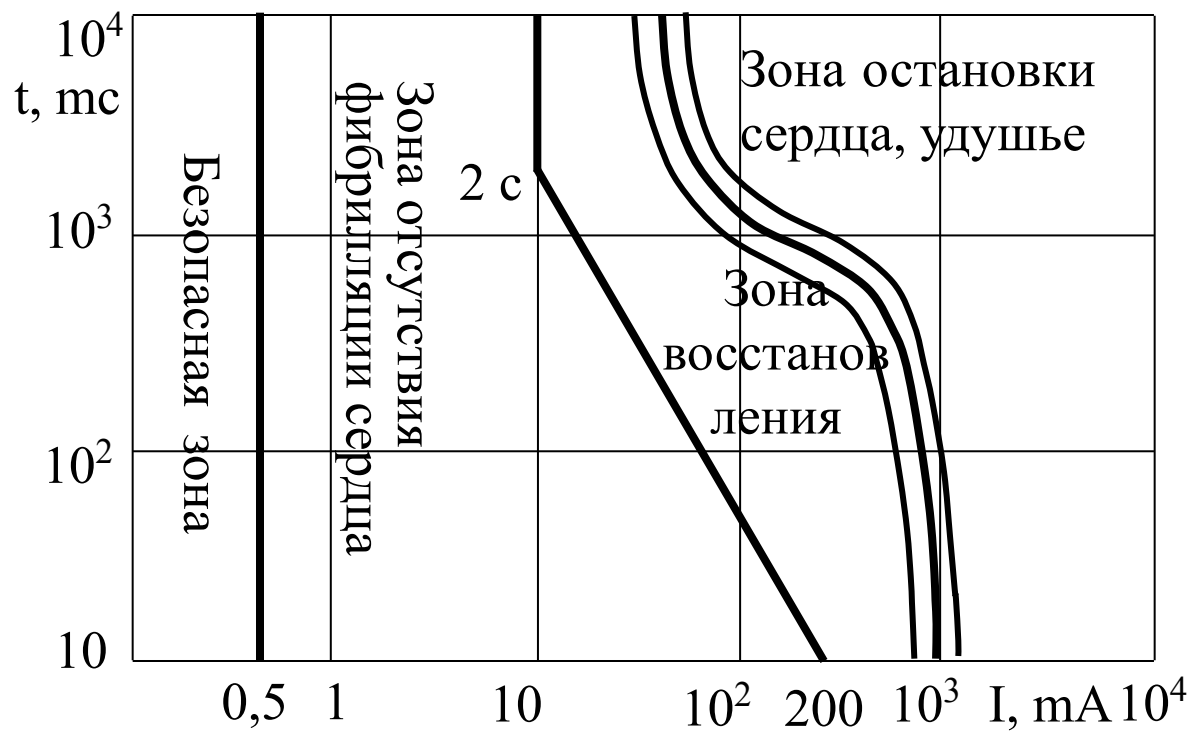


Схема замещения тела

Действие электротока частотой 50 Гц на человека



Зоны пороговых значений тока через тело человека

-

Место для формулы.

