

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

**А.Ф. Шаталов, И.Н. Воротников, М.А. Мастепаненко, И.К.
Шарипов, С.В. Аникуев**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

Учебное пособие

Ставрополь

«АГРУС»

2014

УДК 537.86/87:621.31

ББК 32.86-01:31.2

Рецензент

доцент кафедры Э и ЭЭО ФГБОУ ВПО «Ставропольский
государственный аграрный университет» *В.Н. Шемякин*

Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебное пособие / А. Ф. Шаталов, И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко, И. К. Шарипов, С. В. Аникуев. – Ставрополь : АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2014. – 60 с.

Рассмотрены общие вопросы электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики, источники и каналы передачи помех, методы и технические средства борьбы с радиопомехами, помехоустойчивость, а также методы испытаний и сертификации элементов вторичных цепей на помехоустойчивость, нормы по допустимым напряженностям электрических и магнитных полей промышленной частоты для персонала и населения.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с основной образовательной программой подготовки бакалавра по направлениям 140400 «Электроэнергетика и электротехника» и 110800 «Агроинженерия».

Курс рассчитан на студентов всех форм обучения, его информационное содержание достаточно для изучения дисциплины в объеме, предусмотренном стандартами высшего профессионального образования.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ И ЕМКОСТЕЙ

Цель занятия: научиться рассчитывать электрические ёмкости и взаимные индуктивности типичных систем, встречающихся на объектах электроэнергетики.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электрическая ёмкость и взаимная индуктивность напрямую связаны со степенью электромагнитного влияния объектов друг на друга, они определяются геометрическими размерами и топологией проводников входящих в рассматриваемые системы [1, 2, 3].

Под емкостью C между двумя телами, на которых имеются электрические заряды Q , понимают абсолютную величину отношения заряда на одном из тел к напряжению между телами [2, 3, 4, 5]:

$$C = Q/U. \quad (1.1)$$

Из определения следует единица измерения электрической емкости – 1 кулон/вольт = 1 фарад (ф). Так как напряжение между телами в электростатике может быть линейно выражено через заряд (за исключением сегнетоэлектриков), то емкость, очевидно, зависит лишь от конфигурации и размеров тел.

Индуктивность L проводника определяется соотношением:

$$L = \Psi/I, \quad (1.2)$$

где Ψ - потокосцепление, обусловленное током I .

Для двух контуров, магнитные потоки которых взаимно пересекают площади друг друга, аналогично получаем выражение для взаимной индуктивности L_{B3} :

$$L_{B3} = \Psi_1/I_2. \quad (1.3)$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пример расчета. Тонкий длинный провод радиуса R_0 располагается на расстоянии h параллельно бесконечно протяженной проводящей плоскости (рисунок 1.1). Определить электрическую емкость между проводом и плоскостью, на единицу их длины, считая, что $R_0 \ll h$.

Решение. Для учета проводящей поверхности дополним чертеж зеркальным изображением проводника – согласно методу зеркальных изображений. Тогда проводник и плоскость можно эквивалентно заменить двухпроводной линией с расстоянием между проводниками $2h$. Из определения электрической емкости $C = Q/U$. Примем заряд проводников $\pm Q$. Найдем напряжение между ними используя соотношение $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$. С учетом зависимости потенциала и напряженности поля прямолинейного бесконечно длинного провода лишь от одной координаты получаем $E = -\frac{d\varphi}{dx}$. Отсюда $U = -\int E dx$.

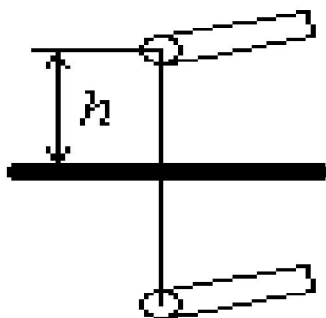


Рисунок 1.1 – Расположение проводника и проводящей плоскости

Из теоремы Гаусса, напряженность поля заряженного проводника находится как $E = \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot x}$. Так как заряд нити определится через линейную плотность зарядов как $Q = \tau \cdot l$, то после подстановок получаем:

$$C = \frac{\tau \cdot l}{-\int_{R_0}^{2h-R_0} \frac{\tau \cdot dx}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot x}} \quad (1.4)$$

После преобразований и с учетом, что электрическая емкость на единицу длины равна $C_0 = C/l$, получаем электрическую емкость между проводом и проводящей плоскостью на единицу их длины:

$$C_0 = \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{2 \cdot h}{R_0}}. \quad (1.5)$$

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задача 1.1. Определить индуктивность двухпроводной линии на единицу ее длины, если диаметр проводников R , а расстояние между их осями d .

Задача 1.2. Определить электрическую емкость коаксиального кабеля на единицу его длины, если диэлектрическая проницаемость изоляции $\varepsilon = 2$, диаметр внутренней жилы 1 мм, внутренний диаметр наружной жилы 5 мм.

Задача 1.3. Рассчитать взаимную индуктивность проводящего квадратного контура и прямого бесконечно длинного проводника, лежащего в плоскости контура. Взаимное расположение проводника и контура показано на рисунке 1.2.

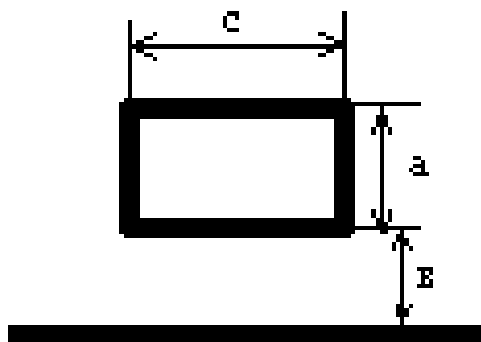


Рисунок 1.2 – Расположение проводника и проводящего контура.

Задача 1.4. Определить индуктивность на единицу длины стальной шины с поперечным сечением в виде прямоугольника имеющего стороны 1 мм и 5 см. Сравнить эту индуктивность с индуктивностью круглого проводника с площадью, равной площади шины.

Задача 1.5. Рассчитайте электрическую емкость на единицу длины двух протяженных цилиндрических проводов диаметрами 2 см, геометрические оси которых находятся на расстоянии 5 см друг от друга.

ВОПРОСЫ

1. Что такое магнитный поток и потокосцепление?
2. Дайте понятие индуктивности и взаимной индуктивности?
3. Что такое электрическая емкость?
4. В каких единицах измеряются индуктивность и электрическая емкость? В чем разница между погонными величинами индуктивности и емкости и полными их значениями?
5. Как связаны между собой напряженность и потенциал электростатического поля?
6. От чего зависят индуктивность, взаимная индуктивность и электрическая емкость системы проводников.
7. Опишите способы расчета электрических емкостей.
8. Опишите способы расчета индуктивностей.

2. УРОВНИ ПОМЕХ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭМС - НОМОГРАММЫ ПРИ ОПИСАНИИ ПОМЕХ

Цель занятия: научиться определять логарифмические относительные уровни помех и представлять импульсные помехи в частотной и временной областях, с использованием ЭМС номограммы.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Уровни и интервалы помех

Для целенаправленного планирования мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости должны быть известны:

- электромагнитная обстановка, характеризующаяся амплитудными и частотными спектрами напряжений и токов источников помех, напряженностью поля;
- механизм связи и ее количественная оценка в виде коэффициентов затухания или передаточных функций;
- восприимчивость или чувствительность приемника помех, характеризующаяся пороговыми значениями помех в функции от частоты или времени [1,5,6].

Для количественной оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) пользуются логарифмическими масштабами напряжений, токов, напряженностей электрического или магнитного поля, мощностей в относительных единицах, что позволяет наглядно представить соотношения величин, отличающихся на много порядков. Различают логарифм отношения уровня и степени передачи помехи.

Уровни определяют отношение величины (например, напряжения U_x) к постоянному базовому значению (напряжения U_0), которое часто задается в единицах: $U_0 = 1$ мкВ и т.д..

Степень передачи определяется отношением входных и выходных величин системы и служат характеристикой ее передаточных свойств. Она представляет собой логарифмы обратных значений коэффициентов передачи, например, коэффициентов затухания мощности, ослабления за счет экранирования, снижения противофазной помехи по отношению к синфазной.

С применением десятичного логарифма $\log_{10} = \lg$ определяют в децибелах, например, следующие величины, принимая базовыми величинами $U_0=1$ мкВ, $I_0=1$ мкА, $E_0=1$ мкВ/м, $H_0=1$ мкА/м, $P_0=1$ нВт:

а) напряжение:

$$U_{дБ} = 20 \lg(U_x/U_0), \text{ где } U_0 = 1 \text{ мкВ}; \quad (2.1)$$

б) ток:

$$I_{дБ} = 20 \lg(I_x/I_0), \text{ где } I_0 = 1 \text{ мкА}; \quad (2.2)$$

в) напряженность электрического поля:

$$E_{дБ} = 20 \lg(E_x/E_0), \text{ где } E_0 = 1 \text{ мкВ/м}; \quad (2.3)$$

г) напряженность магнитного поля:

$$H_{дБ} = 20 \lg(H_x/H_0), \text{ где } H_0 = 1 \text{ мкА/м}; \quad (2.4)$$

д) мощность:

$$P_{дБ} = 20 \lg(P_x/P_0), \text{ где } P_0 = 1 \text{ нВт}. \quad (2.5)$$

Вышеуказанные уровни были определены с применением постоянной базовой величины и поэтому обобщенно называются абсолютными уровнями. Они характеризуют значения конкретных величин [1, 4, 5, 6]. Чтобы подчеркнуть, что величина является базовой в ее обозначение, помимо дБ вводятся дополнительные индексы мкВ, мкА, например, дБ_{мкВ}, дБ_{мкА} и т.д.

Подобно тому, как при использовании десятичного логарифма \lg были образованы отношения величин в децибелах (дБ) при помощи натурального логарифма \ln можно образовать отношение величин в неперах (Нп):

$$1 \text{ Нп} = e = (U_x/U_0). \quad (2.6)$$

Между непером и децибелом существуют соотношения:

$$\frac{1}{2} \ln(U_x/U_0), \text{ Нп} = 20 \lg(U_x/U_0), \text{ дБ}, \quad (2.7)$$

или

$$1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ}; 1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп}.$$

Таким образом, применяя натуральный логарифм, можно принимая базовые значения определить аналогичным образом отношение величин в неперах ($1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ}$).

В целом, в электромагнитной совместимости среди уровней помех различают *абсолютный* и *относительный* уровни.

Абсолютный уровень определяется для ряда значений: *уровень помех, пороговое значение помехи, уровень полезного сигнала*, отнесенных к определенной базовой величине (например, мкВ).

Пример соотношений уровней полезного сигнала и помехи в зависимости от частоты приведен на рисунке 2.1.

Уровнем помех называют относительное значение помехи (рисунок 2.1), при этом предел ее допустимых уровней определяют в стандартах DIN/VDE, ГОСТ, ОСТ.

Пороговое значение помехи это наименьшее относительное значение полезного сигнала, превышение которого в месте приема воспринимается как помеха.

Уровень полезного сигнала – относительное 100% значение полезного сигнала.

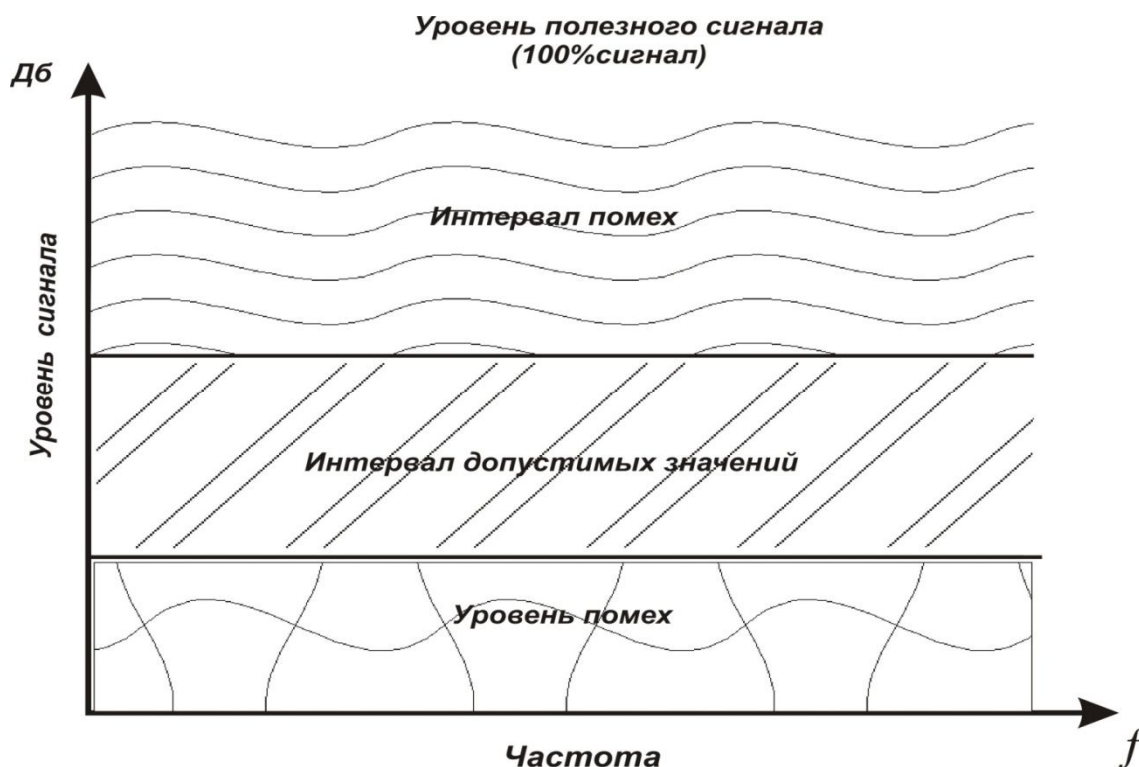


Рисунок 2.1 – Уровни и интервалы помех

Относительный уровень определяется в виде *интервала* как разность уровней.

Интервалом помехи называют разность между уровнями полезного сигнала и порогового значения помехи (рисунок 2.1), исчисляемый так же, как логарифм отношения значения полезного сигнала и порогового значения помехи.

Интервал допустимых помех – разность между пороговыми значениями помехи и значением помехи, исчисляемая также логарифмом отношения порогового и действующего значения.

При аналоговых сигналах интервал помехи должен быть не менее 40 дБ, в радио и телевидении – от 30 до 60 дБ, в телефонии около 10 дБ. Точные значения берутся из соответствующих норм (DIN/VDE), основанных на международном сотрудничестве в МЭК или CISPR с учетом частоты воздействия.

2.2 ЭМС – номограмма

Распространение импульсных помех, их затухание вдоль пути распространения, а также их влияющее воздействие на различные места подверженной помехе системы могут быть описаны непосредственно во временной или частотной областях.

Поскольку передаточные свойства путей связи и средств помехоподавления удобно представлять в частотной области, то для перехода из временной в частотную используют преобразования Фурье.

Для быстрой практической (и соответственно, графической) реализации преобразования Фурье используют ЭМС – номограмму (номограмма электромагнитной совместимости).

ЭМС – номограмма служит для:

- графического определения огибающей (наихудший случай) плотности распределения амплитуд заданного импульса помехи стандартной формы (графическое преобразование «временная область – частотная область»);
- синтеза формы импульса, эквивалентного помехе, из заданного спектра помехи (графическое обратное преобразование «частотная область – временная область»);
- учета частотозависимых передаточных свойств путей связи, средств помехозащиты и т. п.

Рассмотрим трапециевидный импульс (рисунок 2.2). Используя преобразования Фурье плотность распределения амплитуд (рисунок 2.2) определяется выражением:

$$U(f) = 2U_m \tau \frac{\text{Sin}\pi f \tau}{\pi f \tau} \frac{\text{Sin}\pi f \tau_k}{\pi f \tau_k}. \quad (2.8)$$

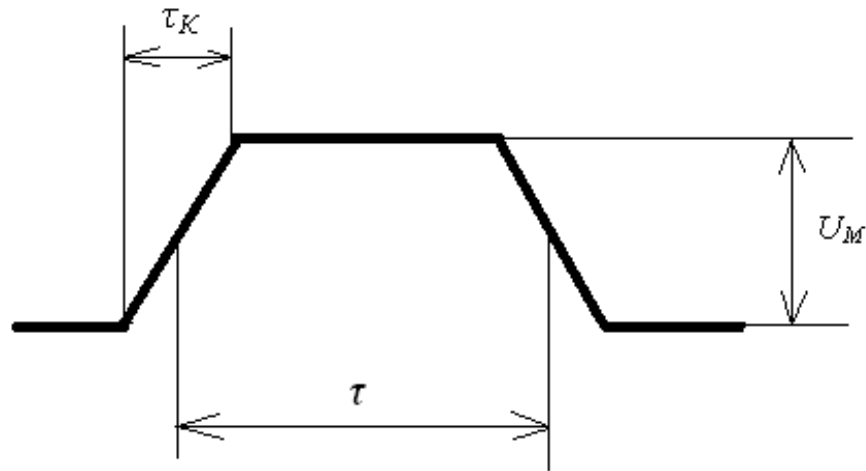


Рисунок 2.2 - Трапециевидный импульс

При $\tau_k=0$ трапециевидный импульс преобразуется в прямоугольный, при $\tau=0$ - в треугольный. Таким образом, трапециевидный импульс включает большую часть встречающихся в практике импульсов.

ЭМС - номограмма базируется на аппроксимации огибающей плотности распределения амплитудной плотности тремя отрезками прямой (рисунок 2.3).

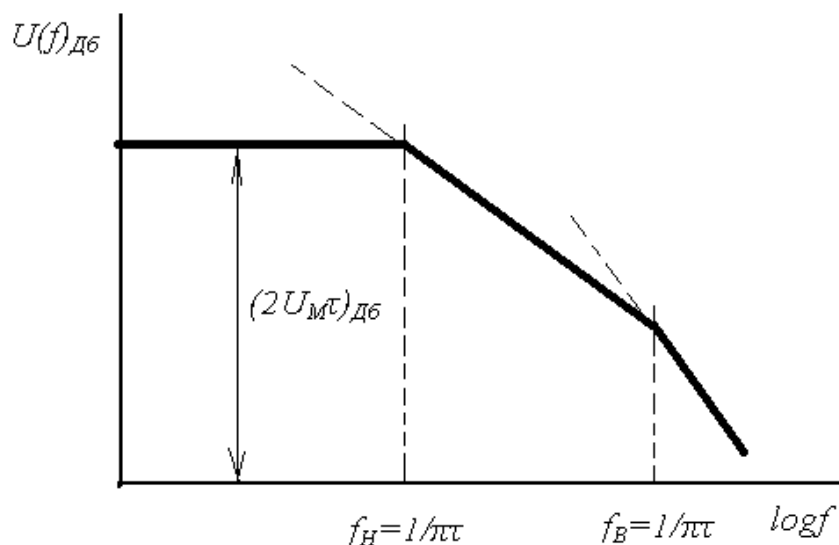


Рисунок 2.3 – Огибающая «физической» плотности распределения амплитуд трапециевидного импульса (линейная аппроксимация):

f_H – нижняя; f_B – верхняя сопрягающая частоты

Для низкочастотного диапазона $f \leq f_H$ ($f_H=1/\pi\tau$) огибающая параллельна оси абсцисс, так как синус приблизительно равен своему аргументу:

$$U(f) = 2U_m\tau = const. \quad (2.9)$$

Плотность распределения амплитуд гармоник (в дБ) зависит исключительно от площади импульса:

$$U(f)_{дб} = 20\lg\left(\frac{2U_m\tau}{A_0}\right), \quad (2.10)$$

где $A_0=1$ мкВ·с

Для среднечастотного диапазона $1/\pi\tau < f < 1/\pi\tau_k$:

$$U(f) = \frac{2U_m\tau}{\pi f\tau} = \frac{2U_m}{\pi f}, \quad (2.11)$$

то есть спад амплитуды с частотой составляет 20 дБ/декаду:

$$u(f)_{дб} = 20\lg\frac{2U_m}{\pi f A_0}. \quad (2.12)$$

В высокочастотном диапазоне $f > f_B$ ($f_B=1/\pi\tau_k$):

$$U(f) = 2U_m\tau \frac{1}{\pi f\tau} \frac{1}{\pi f\tau_k},$$

или

$$u(f)_{дб} = 20\lg\frac{2U_m}{\pi^2 f^2 \tau_k A_0}, \quad (2.13)$$

то есть 40 дБ/декаду.

Для перехода из частотной области во временную область необходимо найти площадь импульса:

$$U_m\tau = \frac{1}{2} 10^{\frac{u(f)_{дб}}{20}} [\text{мкВ}\cdot\text{с}]. \quad (2.14)$$

Плотность распределения амплитуд импульса определяется:

$$U = \frac{\pi f_H}{2} 10^{\frac{U(f_H)_{дБ}}{20}} \text{ [мкВ]}, \quad (2.15)$$

Крутизну фронта нарастания импульса можно определить по выражению:

$$\frac{U_m}{\tau_k} = \frac{\pi^2 f_B^2}{2} 10^{\frac{U(f_B)_{дБ}}{20}} \text{ [мкВ/с]}. \quad (2.16)$$

Длительность импульса определится из соотношения:

$$\tau = \frac{1}{\pi f_H}. \quad (2.17)$$

Время нарастания импульса:

$$\tau_k = \frac{1}{\pi f_B}. \quad (2.18)$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пример расчета. Построить ЭМС - номограмму импульса амплитудой 7.25 В, длительность 0.024 с, длительности переднего и заднего фронтов 0.004 с. Построить ЭМС - номограмму этого же импульса по прохождению его через фильтр с коэффициентом ослабления 60 дБ.

Решение. Введем данные:

$$U_m := 7.25 \quad \tau := 0.024 \quad \tau_k := 0.004 \quad U_0 := 10^{-6}$$

Определим сопрягающие частоты:

$$f_n := \frac{1}{\pi \cdot \tau} \quad f_b := \frac{1}{\pi \cdot \tau_k} \quad f_n = 13.263 \quad f_b = 79.577$$

Запишем выражения для определения зависимости уровня (в Дб) от частоты в диапазонах нижних, средних и высоких частот:

$$f1 := 0,0 + 1.. f_n \quad U1(f1) := 20 \cdot \log\left(2U_m \cdot \frac{\tau}{U_0}\right) \quad U1(0) = 110.832$$

$$f2 := f_n, f_n + 1.. f_b \quad U2(f2) := 20 \cdot \log\left(2 \cdot \frac{U_m}{\pi \cdot f2 \cdot U_0}\right)$$

$$f3 := f_b, f_b + 10.. 500000 \quad U3(f3) := 20 \cdot \log\left(2 \cdot \frac{U_m}{\pi^2 \cdot f3^2 \cdot \tau_k \cdot U_0}\right)$$

Построим ЭМС - номограмму:

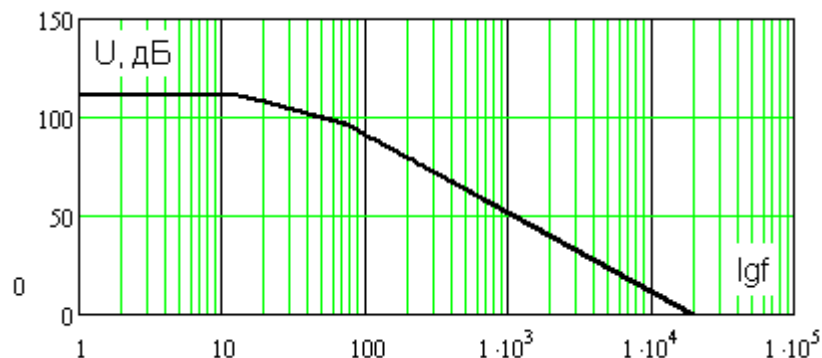


Рисунок 2.4 – ЭМС - номограмма исходного импульса напряжения

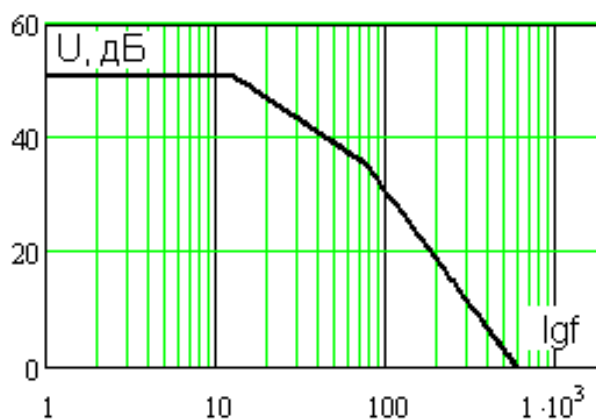


Рисунок 2.5 – ЭМС - номограмма импульса напряжения, прошедшего через фильтр

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задача 2.1. Построить ЭМС - номограмму импульса амплитудой 0.25В, длительность 0.04с, длительности переднего и заднего фронтов 0.002с. Построить ЭМС - номограмму этого же импульса по прохождению его через фильтр с коэффициентом ослабления 20дБ.

Задача 2.2. Построить ЭМС - номограмму П - импульса амплитудой 0.5В, длительностью 0.02с. Построить ЭМС - номограмму этого же импульса по прохождению его через фильтр с коэффициентом ослабления 10дБ.

Задача 2.3 Построить ЭМС - номограмму импульса амплитудой 0.2В, длительностью 0.05с, длительности переднего и заднего

фронтов 0.025с. Построить ЭМС - номограмму этого же импульса по прохождению его через фильтр с коэффициентом ослабления 20дБ.

Задача 2.4. Определить длительность, время нарастания, амплитуду импульса, его энергию по заданным на рисунках 2.6, 2.7, 2.8 ЭМС - номограммам.

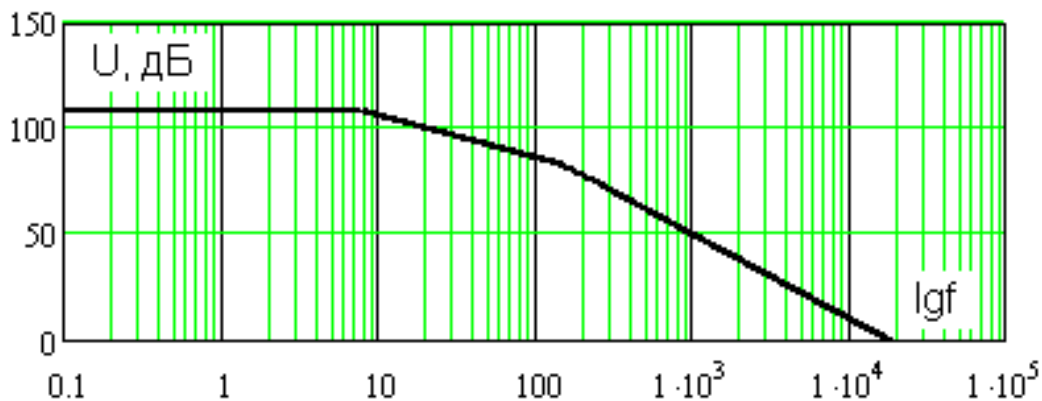


Рисунок 2.6

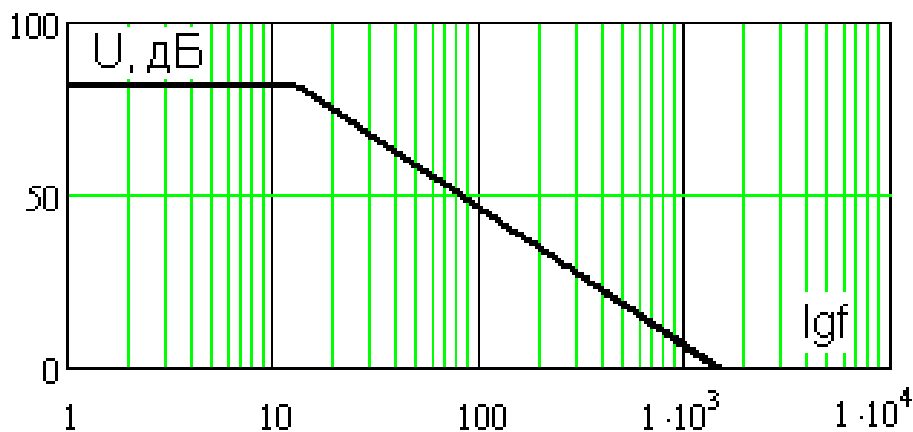


Рисунок 2.7

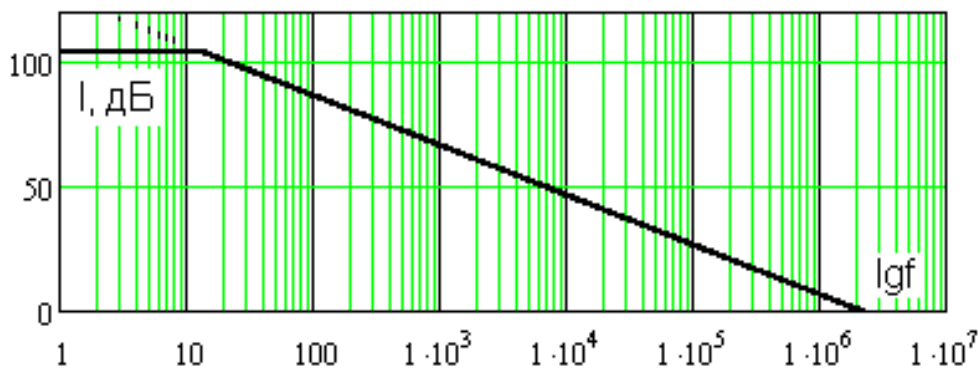


Рисунок 2.8

ВОПРОСЫ

1. Как определяются уровни помех? Что такое абсолютный и относительный уровни помех?
2. Для чего при оценке уровней помех используют логарифмические единицы?
3. Что такое помехоподавление и как его оценивают?
4. Что такое ЭМС - номограмма и для чего её используют?

3. РАСЧЕТ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Цель занятия: Научится определять логарифмические относительные уровни помех и передающихся путем гальванической связи.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Гальваническая связь

Гальваническая связь возникает, если некоторое полное сопротивление оказывается общим для двух или нескольких контуров. Различают связь между контурами заземления и через цепь общего питания полным сопротивлением $Z = R + j\omega L$.

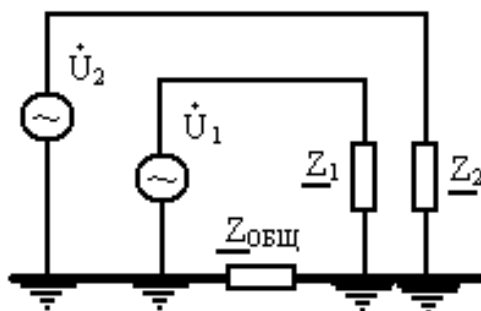


Рисунок 3.1 - Гальваническая связь через контур заземления

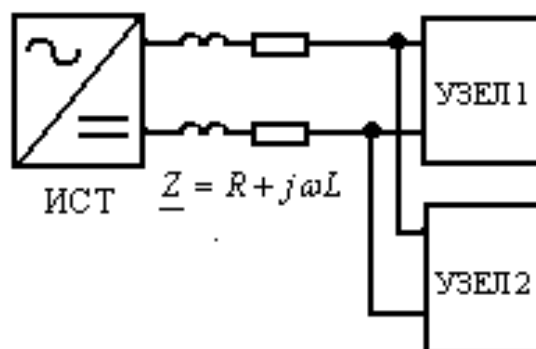


Рисунок 3.2 - Гальваническая связь через цепи питания

Если два или несколько контуров имеют общее сопротивление, например, в общем проводе, то падение напряжения на нем проявляется в другом контуре как напряжение противофазной помехи [1, 5, 6, 7].

Для гальванической развязки в этом случае следует:

А) уменьшать общее полное сопротивление соединительных проводов электропитания, посредством уменьшения их длины, скручивания;

Б) использовать функциональные узлы с более высоким питающим напряжением, применять стабилизаторы для каждого устройства отдельно,

В) использовать отдельные соединительные провода для каждого устройства.

Типичными примерами первого типа связи являются воздействие на сеть коммутационной аппаратуры и выпрямителей, изменения тока при переключении цифровых цепей и включение катушек реле и контакторов, токи в проводящих проводах коллекторных двигателей. и т.д.

Связь через контур заземления возникает всегда, когда синфазные напряжения вызывают нежелательные токи через неоднократно заземленные нулевые провода, кабельные экраны, корпуса измерительных приборов и т.д

Контур заземления или петли относятся к наиболее часто встречающимся причинам электромагнитных влияний. Для их устранения используют разделительные и нейтрализующие трансформаторы.

Очевидно, при включении разделительного трансформатора (рисунок 3.3.) цепь оказывается гальванически разомкнутой по постоянному току.

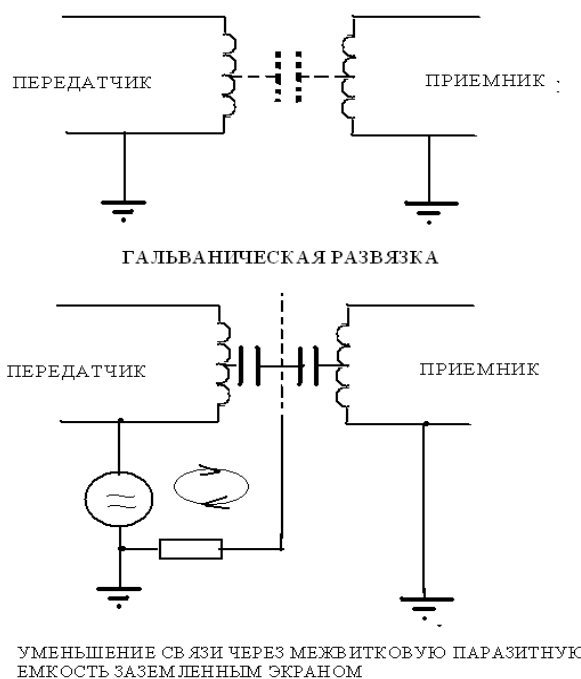


Рисунок 3.3 - Включение разделительных трансформаторов

Однако не следует забывать, что с ростом частоты сигнала помехи возрастает электрическая емкость между обмотками трансформатора.

Если развязка электрической цепи по постоянному току недопустима, то используют нейтрализующие трансформаторы, схема их включения приведена на рисунке 3.4.

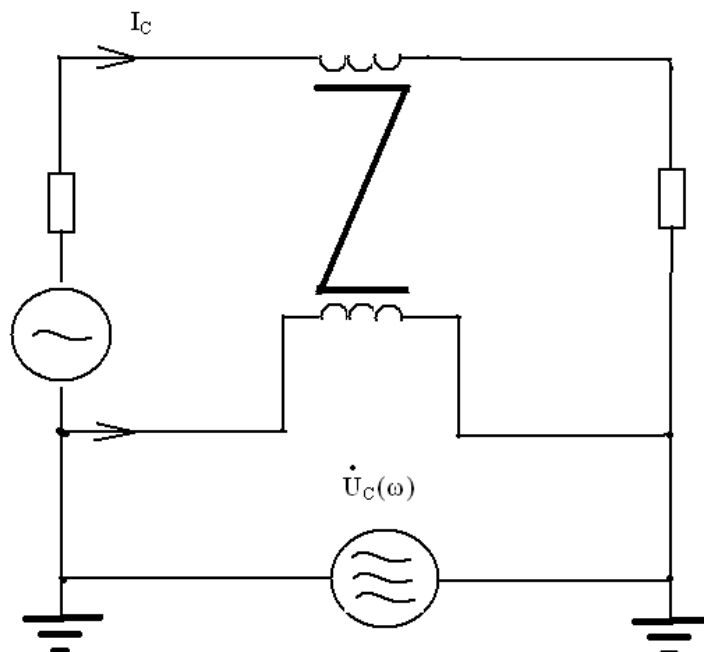


Рисунок 3.4 - Нейтрализующий трансформатор для разрыва контура заземления

С появлением микроэлектроники большое распространение получили оптроны и световодные длинные линии также используемые для разрыва гальванических связей в цепях управления и передачи информации.

Для упрощенного стандартизированного описания электромагнитной обстановки вводят типовые классы окружающей среды по помехам идущим по проводам:

Класс 1. (очень низкий уровень помех): коммутационные перенапряжения в цепях управления подавлены соответствующими цепями, линии сильного тока и линии управления проложены отдельно, линии электропитания на обоих концах заземлены и снабжены сетевыми фильтрами.

Класс 2. (низкий уровень помех): коммутационные перенапряжения частично ограничены, линии сильного тока и управления отделены.

Класс 3. (уровень промышленных помех): релейные катушки не снабжены ограничительными цепями, необязательное разделение

сильноточных линий и линий управления, сигнальные линии и линии питания разделены, используется общая система заземления. Пример - щиты управления электростанцией и промышленные предприятия.

Класс 4. (высокий уровень помех): нет ограничительных цепей, необязательное разделение линий управления, сигнальных линий, телефонных линий и сильноточных линий, использованы многожильные кабели.

Пример - установки открытого типа на электростанциях, устройства технологического управления, распределительные устройства линий высокого напряжения.

Класс X. (экстремальный уровень помех): особый случай, когда по своей природе не могут быть учтены обычно действующие нормы. Компромисс достигается на особых договорных условиях между производителем и потребителем приборов.

3.2 Противофазные и синфазные помехи

Противофазные помехи $U_{ПФ}$ возникают между прямыми и обратными проводами электрических контуров или между входными зажимами подверженных помехам систем, токи $I_{ПФ}$ имеют в прямых и обратных проводах то же направление, что и токи полезных сигналов. В симметричных контурах (в отсутствие заземления) это появление симметричных напряжений, в несимметричных контурах – появление несимметричного напряжения. Напряжения, как правило, чаще всего возникают благодаря магнитной связи, они суммируются с полезным сигналом и могут вызывать различные сбои и повреждения цепей. Так, напряжение противофазной помехи $U_{ПФ}$ вызывает в электрических контурах ток $I_{ПФ}$, который создает на полных сопротивлениях передатчика и приемника падения напряжения:

$$\dot{U}_{\dot{I}0} = \dot{I}_{\dot{I}0} \cdot Z_{-\dot{E}} + \dot{I}_{\dot{I}0} \cdot Z_{-\dot{I}D} . \quad (3.1)$$

Напряжение помехи на приемнике определится, соответственно, как:

$$\dot{U}_{\dot{I}} = \frac{\dot{U}_{\dot{I}0} \cdot Z_{-\dot{I}D}}{Z_{-\dot{I}D} + Z_{-\dot{E}}} . \quad (3.2)$$

Синфазные помехи $U_{сф}$ обуславливаются источниками мешающих напряжений, которые появляются между отдельными сигнальными проводами и массой с нулевым потенциалом в форме кратковременного повышения потенциала относительно земли.

В симметричных электрических контурах синфазное напряжение возникает между электрической серединой цепи и массой и называется ассиметричным напряжением. Прямой и обратный провода имеют одинаковое напряжение относительно земли [1, 5, 6, 7].

В несимметричных цепях синфазные напряжения возникают между отдельными проводами и массой, их называют несимметричным напряжением.

Синфазное напряжение вызывает в параллельных прямом и обратном проводе токи одного направления и характера, которые через паразитные емкости и землю могут вернуться к источнику питания (рисунок 3.5). При различных сопротивлениях прямого и обратного проводов и различных паразитных емкостях токи в них будут различаться. Прямой и обратный провода при этом приобретут различные потенциалы относительно земли и произойдет преобразование синфазной помехи в противофазную.

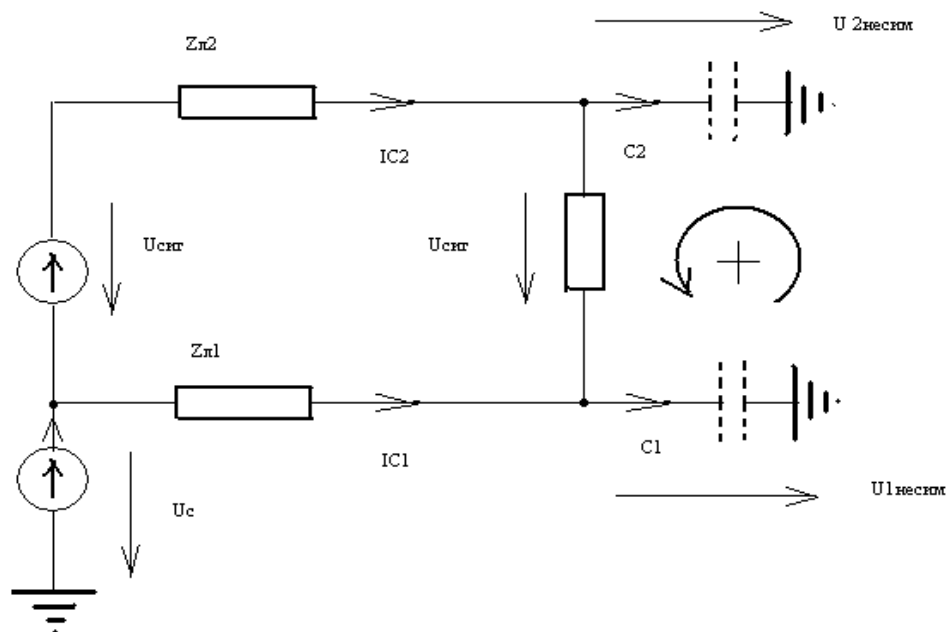


Рисунок 3.5 – Объяснение преобразования синфазной помехи в противофазную

Применение второго закона Кирхгофа к схеме рисунка 3.5 дает:

$$\dot{U}_{СИМ} + \dot{U}_{НЕСИМ}^{(1)} - \dot{U}_{НЕСИМ}^{(2)} = 0$$

ИЛИ

$$\dot{U}_{СИМ} = \dot{U}_{НЕСИМ}^{(2)} - \dot{U}_{НЕСИМ}^{(1)}. \quad (3.3)$$

Мерой степени преобразования синфазной помехи в противофазную является коэффициент преобразования синфазной помехи в противофазную:

$$K = \frac{\left| \dot{U}_{ПФ}(\omega) \right|}{\left| \dot{U}_{ПФ}(\omega) \right|}, \quad (3.4)$$

в логарифмических единицах:

$$K_{сф.пф.} = 20 \cdot \lg \left[\frac{\left| \dot{U}_{ПФ}(\omega) \right|}{\left| \dot{U}_{ПФ}(\omega) \right|} \right]. \quad (3.5)$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пример решения задачи.

Оцените абсолютный и относительный уровни помех в приемнике сигнального контура П, где $U=100В$, $R=0.1Ом$, $X_L=0.1Ом$, $Z_H=10+j10Ом$, $Z_И=1+jОм$, $Z_{ПР}=100+100jОм$. Заземлители стальные трубы длиной 2,5 м, толщиной 0,2 м, проводимость грунта $\gamma=10^{-3}$ См/м, расстояния указаны на рисунке 3.6.

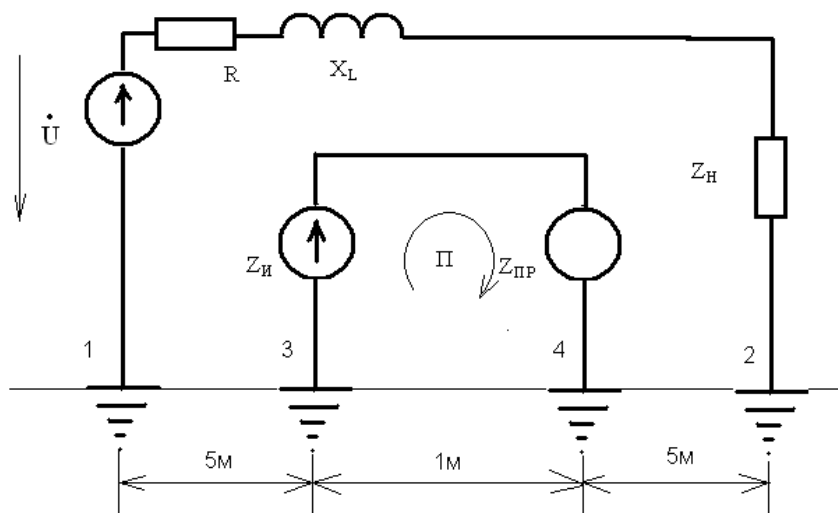


Рисунок 3.6

Вводим данные задачи. Далее, определяем на основе формальной аналогии между полем постоянного тока и электростатическим полем электрическое сопротивление между заземлителями 1 - 2 и 3 - 4:

$$Z1 := \frac{1}{\pi \cdot L \cdot \frac{\gamma}{\ln\left[\frac{(2 \cdot l1 + l2)}{0.5 \cdot d}\right]}}$$

$$Z2 := \frac{1}{\pi \cdot L \cdot \frac{\gamma}{\ln\left(\frac{l2}{0.5 \cdot d}\right)}}$$

$$Z1 = 598.484$$

$$Z2 = 293.174$$

(3.6)

Находим суммарные электрические сопротивления в силовом и сигнальном контурах:

$$Z1o := Z1 + R + i \cdot XL + ZH$$

$$Z2o := Z_{pr} + Z2 + Zi$$

$$Z1o = 608.584 + 10.1i$$

$$Z2o = 394.174 + 10.1i$$

(3.7)

Находим ток, в силовом контуре, напряжение U_2 между точками 3 - 4, ток во втором (сигнальном) контуре и напряжение помехи на приемнике U_{cf} ;

$$\begin{aligned}
I_1 &:= \frac{U}{Z_{1o}} & I_1 &= 0.164 - 2.726i \times 10^{-3} \\
U_2 &:= I_1 \cdot Z_2 & U_2 &= 48.16 - 0.799i \\
I_2 &:= \frac{U_2}{Z_{2o}} & I_2 &= 0.114 - 0.031i \\
U_{cf} &:= I_2 \cdot Z_{pr} & U_{cf} &= 14.544 + 8.288i
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Находим коэффициент (в дБ) передачи помехи из силового в приёмник сигнального контура и абсолютный уровень помехи в приемнике.

$$\begin{aligned}
a &:= 20 \log \left(\frac{|U|}{|U_{cf}|} \right) & a &= 15.525 \\
A &:= 20 \log \left(\frac{|U_{cf}|}{10^{-6}} \right) & A &= 144.475
\end{aligned}$$

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задача 3.1. В цепи (рисунок 3.7) действует синфазная помеха 100 В, частотой 10^{-7} с^{-1} . Считая сопротивление источника малым, сопротивление каждого из проводов $Z_{\text{ПР}}=100+20j$ Ом, а паразитные емкости $C_1=400$ пФ, $C_2=100$ пФ, оцените абсолютный и относительный уровни помех в приемнике и коэффициент синфазно-противофазного преобразования.

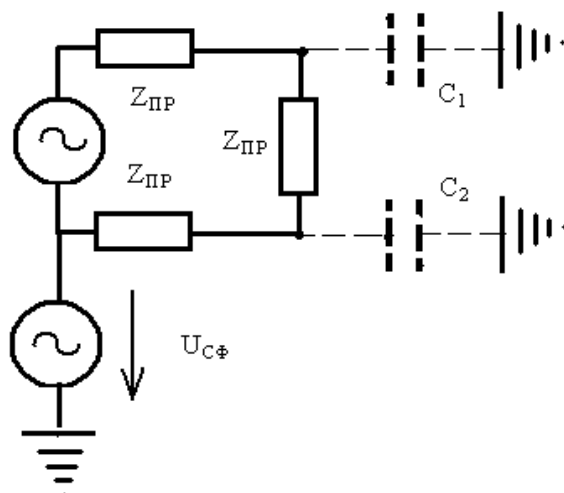


Рисунок 3.7

Задача 3.2. Как изменятся уровни помехи в нагрузке задачи 3.1 и коэффициент синфазно-противофазного преобразования при

увеличении сопротивления приемника до величины $Z_{\text{ПР}}=10000+2000j$ Ом?

Задача 3.3. Оцените коэффициент синфазно-противофазного преобразования для цепи рисунка 3.7 при сопротивлениях приемника и источника а) $Z_{\text{ПР}}=100+20j$ Ом, $Z_{\text{И}}=100+20j$ Ом, б) $Z_{\text{ПР}}=1+2j$ Ом, $Z_{\text{И}}=100+20j$ Ом, в) $Z_{\text{ПР}}=100+20j$ Ом, $Z_{\text{И}}=1+2j$ Ом.

Задача 3.4. Известен коэффициент синфазно-противофазного преобразования $a_{\text{СФПФ}}=15$ дБ. Каково будет напряжение помехи (в вольтах и децибелах) при синфазной помехе 50 В. Какой ток будет протекать через приемник, если сопротивление источника 600 Ом?

ВОПРОСЫ

1. В чем разница между синфазными и противофазными помехами, идущими по проводам?
2. Поясните механизм преобразования синфазных помех в противофазные. Как определить коэффициент синфазно-противофазного преобразования?
3. Опишите физический механизм возникновения гальванической связи.
4. Опишите гальваническую связь через контур заземления.
5. Опишите гальваническую связь через цепи питания.
6. Сформулируйте способы нейтрализации гальванической связи через цепи питания.
7. Опишите использование разделительных и нейтрализующих трансформаторов для уменьшения гальванической связи.

4. РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОЙ СВЯЗИ

Цель занятия: научиться определять логарифмические относительные уровни помех и передающихся посредством индуктивной связи.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Индуктивная (магнитная) связь возникает между двумя или несколькими контурами с токами, магнитные потоки которых взаимно проникают друг в друга. Магнитные потоки индуцируют в пронизываемых ими контурах ЭДС. В результате этого появляются напряжения противофазной помехи, часть которого, определяемая делителем напряжения $Z_2(w)/Z_{ID}(w)$, поступает на вход приемника.

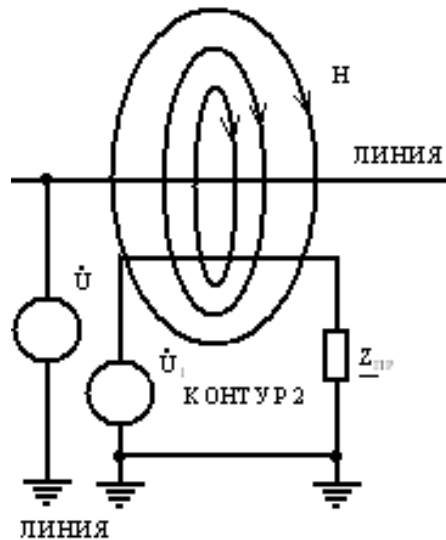


Рисунок 4.1 - Механизм образования индуктивной (магнитной) связи

Взаимную индуктивность между контурами рассчитывают по стандартной методике. Индуцированное напряжение помехи наряду с частотой или скоростью изменения тока пропорционально взаимной индуктивности, а следовательно площади контура [1, 5, 6, 7, 8, 9].

Основными способами снижения индуктивного влияния являются следующие:

- Уменьшение взаимной индукции за счет сокращения длины участков параллельной прокладки;
- Увеличение расстояния между контурами;
- Ортогональное расположение контуров;

- Скручивание проводов;
- Экранирование системы.

Целесообразно уже при планировании предусмотреть раздельную прокладку заведомо мешающих и подверженных влиянию линий. Типичным является применение компенсирующих проводов, параллельных линии и заземленных на концах, однако коэффициент экранирования в этих случаях не более 0,5.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пример решения задач.

Произошел разряд статического электричества на корпус прибора. Определить индуцируемое напряжение в контуре, находящемся внутри прибора (рисунок 4.2).

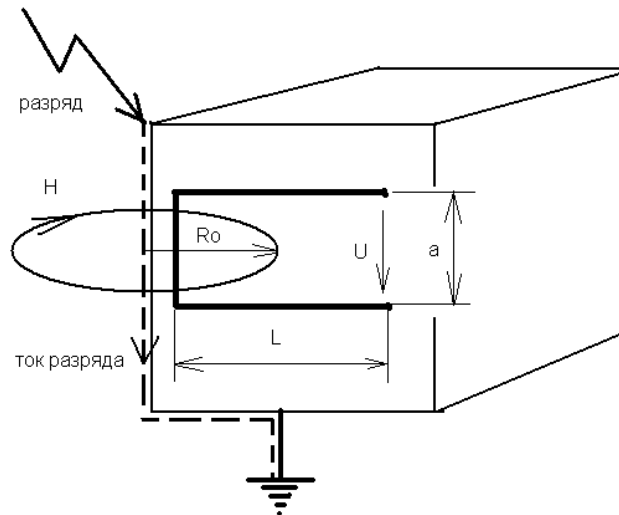


Рисунок 4.2

Решение. Определим среднее расстояние, на которое удален контур от проводника с током разряда R_0 , размеры контура – L , a . Определим из табличных данных среднюю крутизну тока при одиночном разряде статического электричества $\frac{\Delta i}{\Delta t}$.

Используем данные из практического занятия 1, а именно $U = aL \frac{dB}{dt}$, $B = \mu_0 \mu H$, и закон полного тока, из которого получено, что

$H = \frac{i}{2\pi R_0}$, получаем, что:

$$U = \frac{\mu_0 \mu aL \Delta i}{2\pi R_0 \Delta t}. \quad (4.1)$$

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задача 4.1. Оцените максимальное значение ЭДС и ее относительный уровень в стальном контуре (рисунок 4.3), обусловленной стеканием тока при разряде молнии с максимальной крутизной нарастания $(\frac{di}{dt})_{MAX} = 2 \text{ кА/м.}$

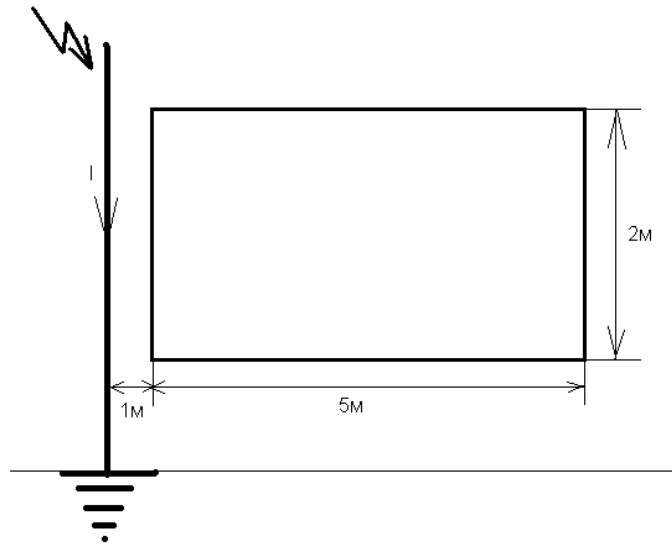


Рисунок 4.3

Задача 4.2. Определите абсолютный и относительный уровни помех по току и по напряжению в нагрузке, возникающие в результате близкого расположения контура с током вблизи к сигнальному контуру (рисунок 4.4). Напряжение источника в контуре с током 200 В, частота 50 Гц, сопротивление нагрузки $20-j10 \text{ Ом}$, источник в сигнальном контуре имеет сопротивление 3000 Ом , приемник 10 кОм .

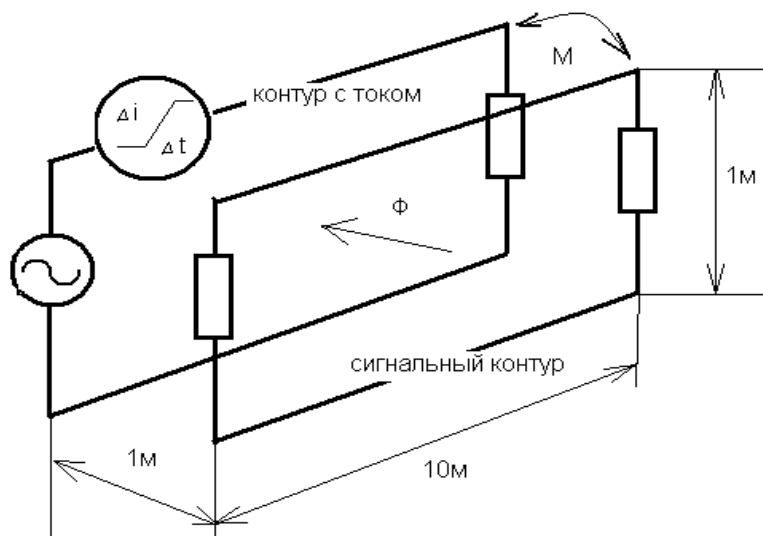


Рисунок 4.4

Задача 4.3. Двухпроводная линия с цилиндрическими проводами диаметром 0,8 мм, расположенными на расстоянии 4 мм друг от друга расположена вблизи аналогичной линии с проводами диаметром 2 мм, расположенными на расстоянии 8 мм. Определите индуктированное на единицу длины напряжение в первой линии в результате импульса тока крутизной 20 А/мс во второй линии. Плоскости двухпроводных линий параллельны друг другу и расположены на расстоянии 2 см.

Задача 4.4. Определить индуктированное напряжение на единицу длины линии задачи 4.3, если поместить ее в цилиндрический экран внутренним диаметром 4,5 мм и внешним 5,5 мм, имеющим относительную магнитную проницаемость 200.

3. ВОПРОСЫ

1. Опишите физический механизм индуктивной связи.
2. Для чего необходимо знать механизмы передачи помех?
3. Как рассчитать индуктивное влияние молнии?
4. Перечислите способы ослабления индуктивного влияния.
5. Опишите индуктивное влияние с точки зрения теории электрических цепей и понятиями теории электромагнитного поля.
6. Охарактеризуйте экранирующее действие экранов кабелей.
7. Как влияет частота на уровень помехи, обусловленной индуктивной связью?

5. РАСЧЕТ ЕМКОСТНОЙ СВЯЗИ

Цель занятия: Научится определять логарифмические относительные уровни помех, передающихся посредством емкостной связи.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Емкостная (электрическая) связь возникает между двумя проводами или проводящими объектами. Вследствие разности потенциалов между ними существует электрическое поле, которое в эквивалентной схеме моделируется емкостью рассеяния (рисунок 5.1). Будем считать, что только 1 провод влияет на 2. Тогда получаем:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_{12}}\right) + \frac{R_2}{(1 + j\omega R_2 C_2)}}{\frac{R_2}{(1 + j\omega R_2 C_2)}}. \quad (5.1)$$

Если система 2 низкоомная, то есть $R_2 \ll 1/\omega C$, тогда получаем:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{j\omega C_{12} R_2}, \quad (5.2)$$

отсюда напряжение помехи составляет:

$$U_I = U_1 j\omega C_{12} R_2. \quad (5.3)$$

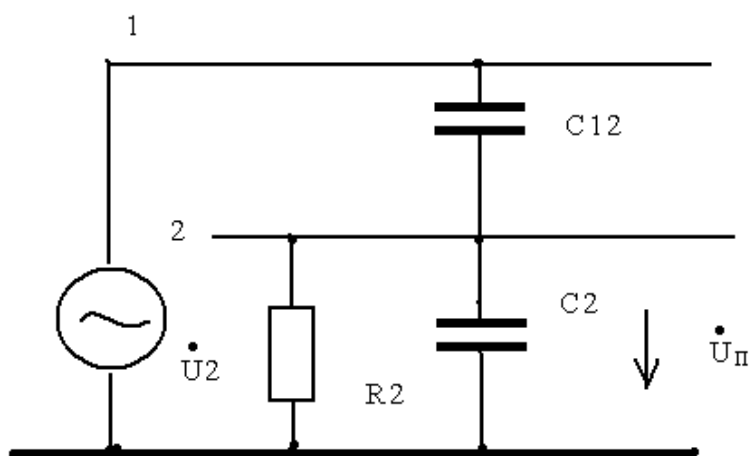


Рисунок 5.1 - Емкостная связь между неэкранированными проводами

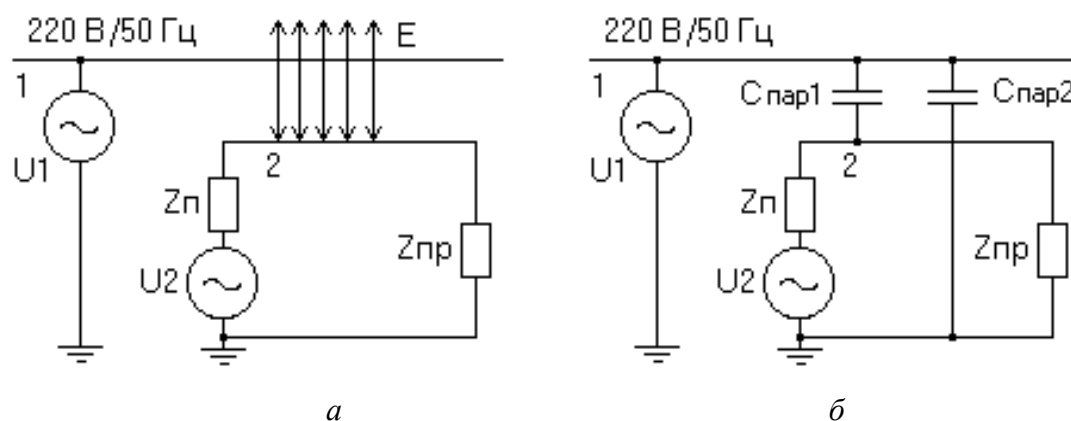
Отсюда непосредственно вытекают меры по снижению емкостного влияния:

1. Уменьшение емкостной связи C_{12} , например сокращением длины участков параллельных проводов, увеличение расстояния между проводами, экранирование системы.

2. Уменьшение величин R_2 .

Квазистатическая емкостная связь, как правило, учитывается только в высокоомных приемниках – осциллографах, микрофонных усилителях [1, 2, 3, 7, 8, 9].

Пример.



**Рисунок 5.2 - Пример электрической связи контуров 1 и 2 через квазистатическое электрическое поле или паразитные ёмкости:
а – полевая модель; б – цепная модель**

Пусть мешающий контур 1 представляет собой сеть 220 В, а подверженный помехе контур 2 – измерительную установку, в которой напряжение в несколько милливольт должно измеряться осциллографом. Между проводом, находящимся под потенциалом 220 В, и измерительными проводами, находящимися почти под потенциалом земли, существует электрическое поле (рисунок 5.2, а), влияние которого может быть отражено в эквивалентной схеме введением паразитных емкостей $C_{\text{пар1}}$ и $C_{\text{пар2}}$ (рисунок 5.2, б). Напряжение сети U_1 вызывает токи смещения через ёмкости утечек, которые через общий массовый провод возвращаются к нулевому проводу сети. Ток через ёмкость $C_{\text{пар1}}$ создаёт на внутренних сопротивлениях передатчика и приёмника в контуре 2 $Z_{\text{п}}$ и $Z_{\text{пр}}$ падение напряжения, которое накладывается на полезный сигнал как помеха.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пример решения задачи. Провод 1 подвергся импульсная помеха с крутизной фронта нарастания напряжения $\frac{du_1}{dt}$ относительно заземленной точки (рисунок 5.3). Оцените величину импульсной помехи в сигнальном проводе 2, заземленном через активное сопротивление а) 1 МОм, б) 100 Ом. Провода расположены в плоскости рисунка 5.3, необходимые размеры указаны на рисунке 5.3, диаметры проводов 3мм, полная длина линий L.

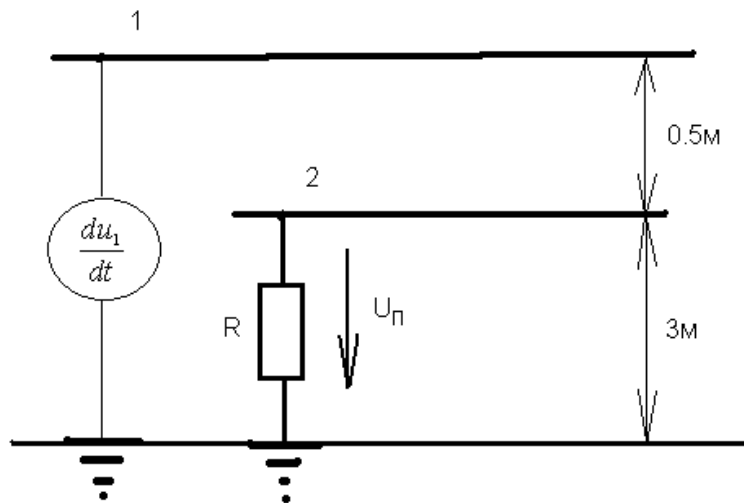


Рисунок 5.3

Решение. Определим, используя группы уравнений Максвелла ёмкости проводов относительно земли C_{11} , C_{22} и взаимную ёмкость $C_{12}=C_{21}$:

$$\alpha_{kk} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_k}{r_k}\right), \quad \alpha_{ki} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{b_{ki}}{a_{ki}}\right). \quad (5.4)$$

Напряжение помехи в линии 2 рассчитывается по формуле: $U_2(t) = \frac{dU_1(t)}{dt} C_{12} R$, где R и крутизна фронта напряжения в первой линии заданы.

Найдем логарифмический относительный уровень помехи:

$$a = 20 \lg \frac{|U_2|}{U_0}. \quad (5.5)$$

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задача 5.1. Оцените целесообразность и эффективность заземления экрана кабеля в точке 1 - рисунок 5.4.

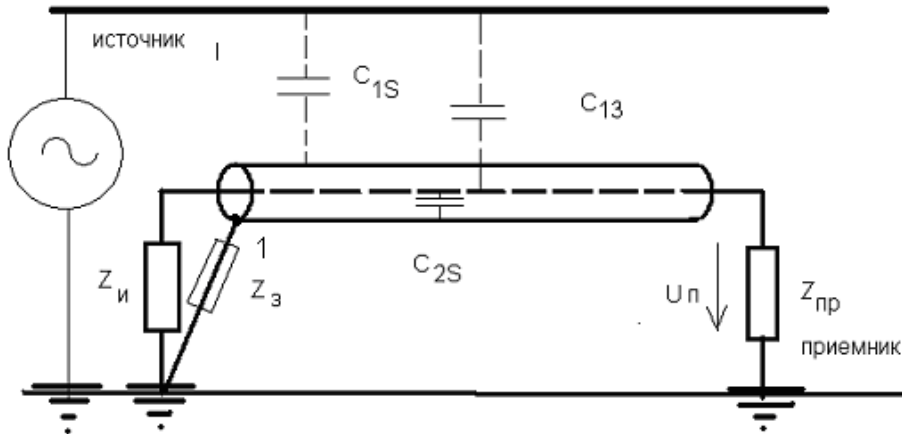


Рисунок 5.4

Задача 5.3. Определите уровни помехи по напряжению и в децибелах, вызванные ударом молнии в точку В (рисунок 5.5). Известны значения емкостей $C_{к}=10$ нФ, $C_{E}=20$ нФ. Данные о параметрах разряда молнии приведены в таблице приложения 1.

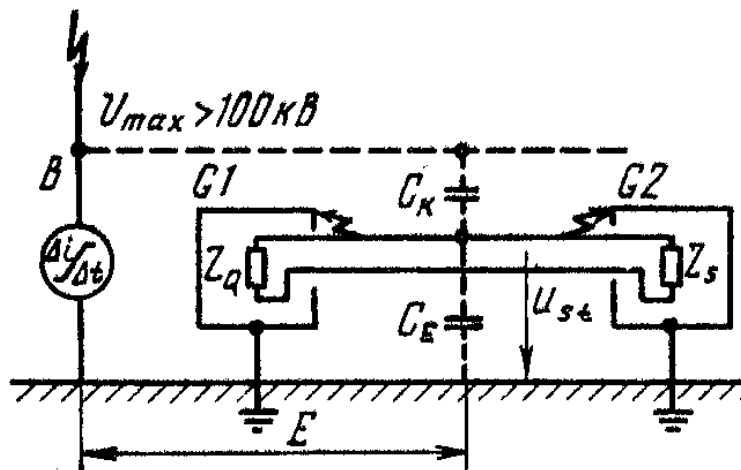


Рисунок 5.5

Задача 5.4. Из - за емкостной связи в контуре наводится напряжение $U_{12}=500$ В, источник и приемник для устранения помех заземлены средней точкой, однако в приемнике из - за несимметрии $Z_{s1}=20+10j$, $Z_{s2}=15+5j$. Определите абсолютный и относительный логарифмические уровни помех в приемнике U_{st} (рисунок 5.6).

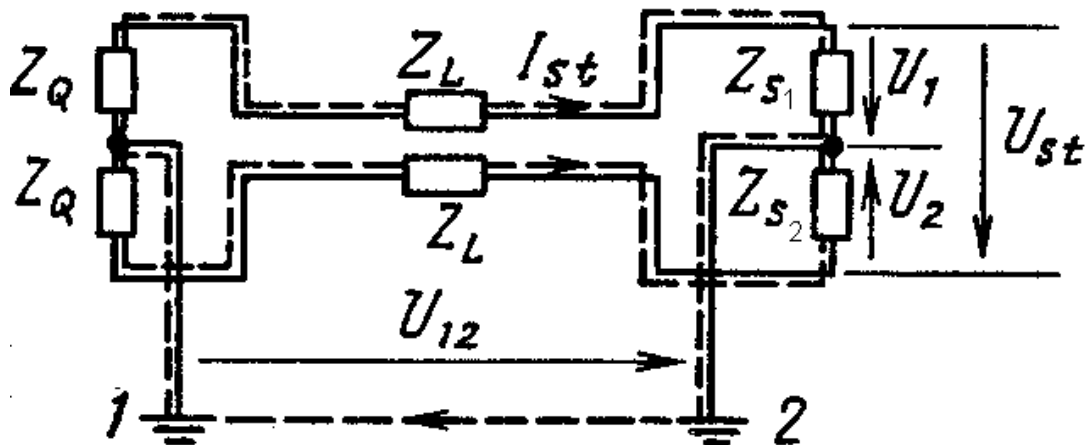


Рисунок 5.6

Задача 5.5. В токовом контуре (рисунок 5.7) действует напряжение помехи $\Delta U=200$ В, принимая емкости $C_1=20$ мкФ, $C_2=2$ мкФ и $R_S > R_Q$, а $R_Q=1$ кОм, определите логарифмические уровни помех в нагрузке R_Q .

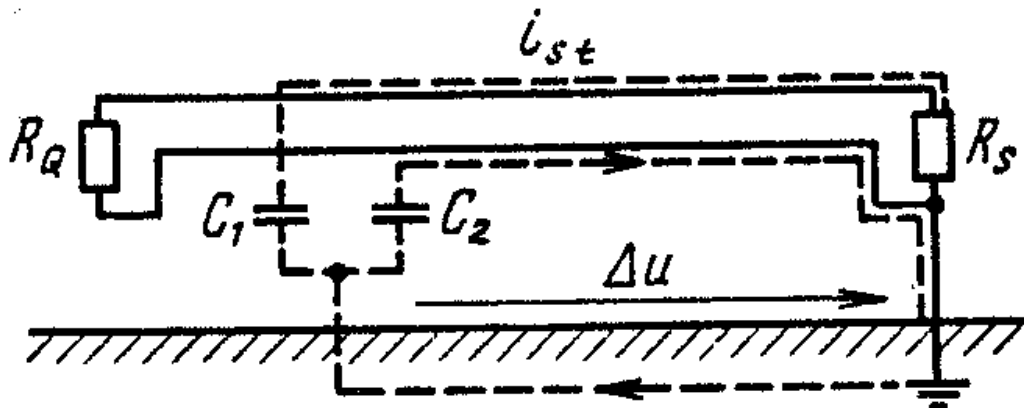


Рисунок 5.7

ВОПРОСЫ

1. Что такое квазистатическая емкостная связь?
2. Как определить абсолютный логарифмический уровень помехи?
3. Как определить относительный логарифмический уровень помехи?
4. Уравнения Максвелла. Физический смысл.
5. Как определить величину импульсной помехи?

6. ПАССИВНЫЕ ПОМЕХОЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Цель занятия: дать понятия фильтров, принципа их действия, коэффициента затухания, классифицировать области применения фильтров.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Фильтры ослабляют распространение помех вдоль проводящих линий. Их применение предполагает, что спектр частот полезного сигнала отдален от спектра частот помехи на половину ширины полосы пропускания или более. Топология фильтра существенно зависит от природы помехи. Симметричное напряжение получается как разность несимметричных напряжений:

$$U_{\dot{I}A\dot{N}\dot{E}i}^{(1)} - U_{\dot{I}A\dot{N}\dot{E}i}^{(2)} + U_{\dot{N}\dot{E}i} = 0 \text{ или } U_{\dot{N}\dot{E}i} = U_{\dot{I}A\dot{N}\dot{E}i}^{(2)} - U_{\dot{I}A\dot{N}\dot{E}i}^{(1)} .$$

Из схемы замещения (рисунок 6.1) можно определить способы закорачивания соответствующих помех при высокой частоте (рисунок 6.2).

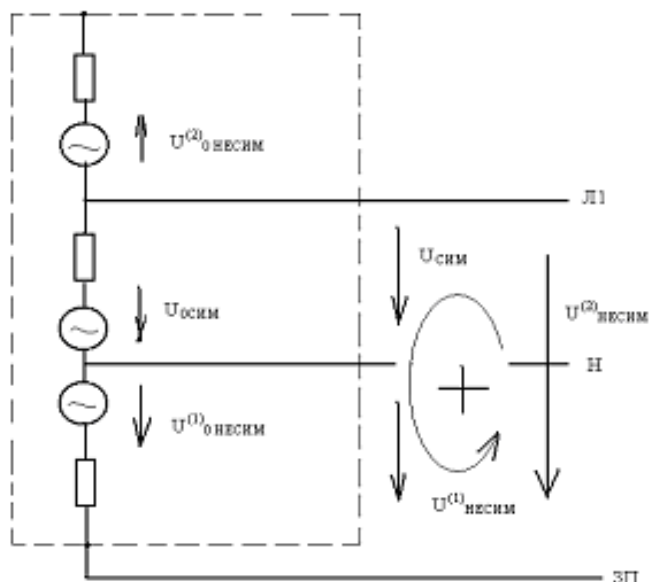


Рисунок 6.1 –Схемы замещения источников помех с симметричными и несимметричными напряжениями помехи

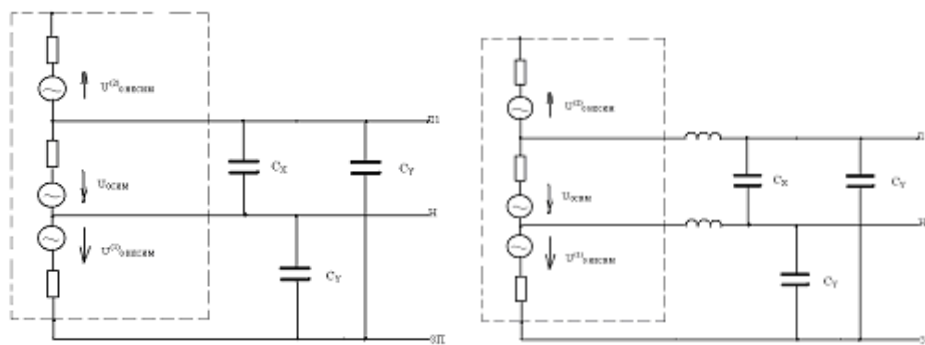


Рисунок 6.2 - Подавление источника противофазных и синфазных помех

При высокой частоте три источника помех (рисунок 6.2) могут быть закорочены конденсаторами. При малых сопротивлениях источников устранение помех требует чрезмерно больших емкостей, поэтому устранение помех осуществляют перед включением катушек индуктивности [1, 2, 5, 6, 10, 11].

Конденсаторы являются наиболее часто применяемыми средствами подавления помех. Многие задачи требуют одновременного подавления симметричных и несимметричных помех. Для этого имеются различные помехоподавляющие конструкции (рисунок 6.3).

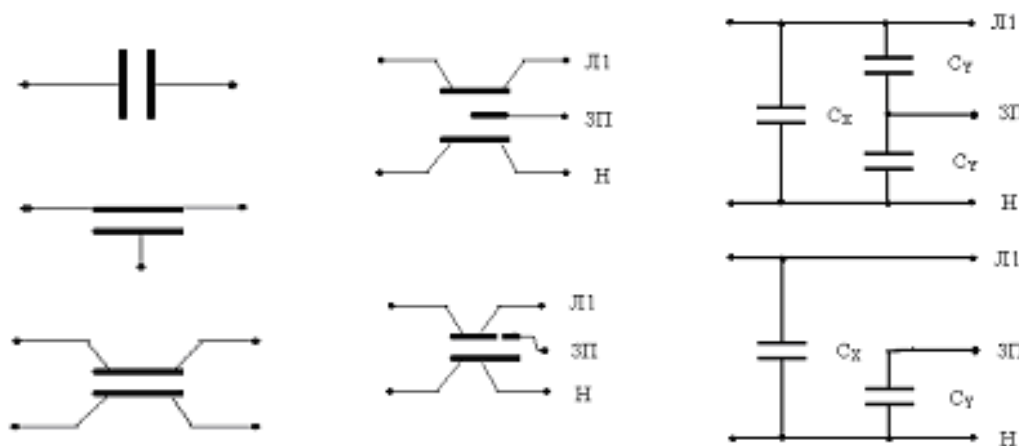


Рисунок 6.3 –Многозвенные помехозащищающие конденсаторы и схемы их замещения

Приведем типовые схемы фильтров фирмы «Siemens» (рисунок 6.4).

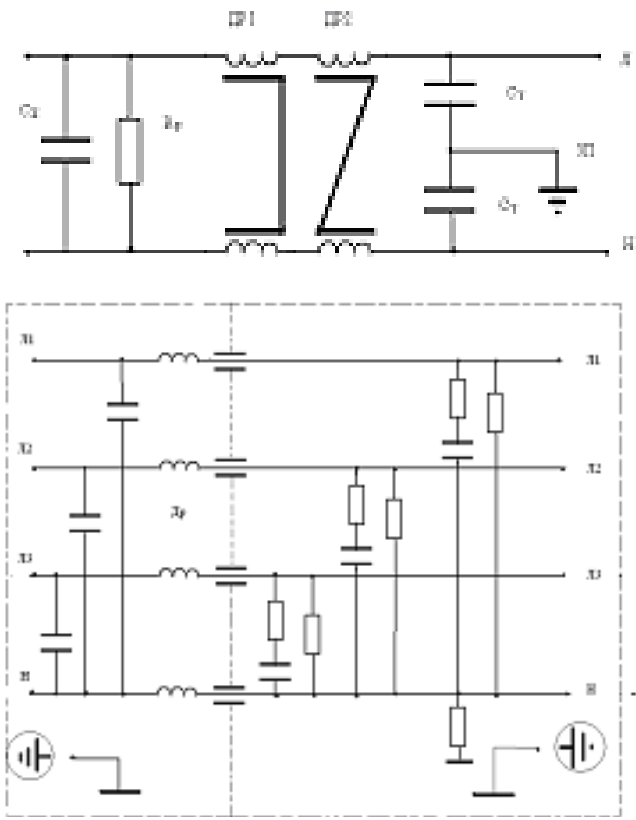


Рисунок 6.4 – Типовые схемы фильтров

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пример решения задачи. Дан электрический фильтр (рисунок 6.5), у которого $C_1=C_2=0.1$ мкФ, $L=0.1$ Гн. Сопротивления источника помех $Z_i=10$ Ом, поглотителя $Z_n=1000$ Ом. Постройте АЧХ данного устройства, учитывая параметры источника и поглотителя помех.

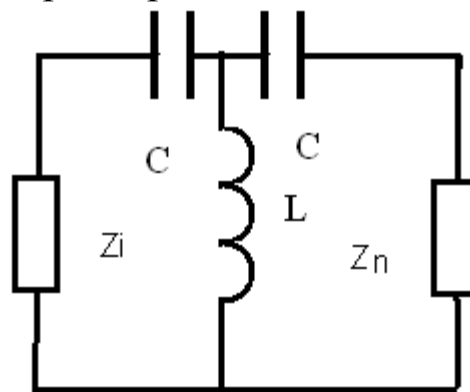


Рисунок 6.5

Решение. Введем данные и частотный интервал для построения АЧХ:

$$i := \sqrt{-1} \quad L := 0.01 \quad C2 := 10^{-5} \quad C1 := C2 \quad f := 0,0 + 1..100000$$

$$Z_i := 10 \quad Z_n := 1000$$

Определим коэффициенты фильтра (как четырехполюсника):

$$Z2(f) := \frac{-i}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C2} \quad Z1(f) := Z2(f) \quad Z0(f) := i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

$$A11(f) := 1 + \frac{Z1(f)}{Z0(f)} \quad A12(f) := Z1(f) + Z2(f) \cdot Z1(f) \cdot \frac{Z2(f)}{Z0(f)} \quad A21(f) := \frac{1}{Z0(f)} \quad A22(f) := 1 + \frac{Z2(f)}{Z0(f)}$$

Определяем коэффициент затухания в функции частоты:

$$a(f) := 20 \cdot \log \left[\left| \left(\frac{Z_n}{Z_n + Z_i} \right) \cdot A11(f) + \left(\frac{A12(f)}{Z_n + Z_i} \right) + \left(\frac{Z_i \cdot Z_n}{Z_i + Z_n} \right) \cdot A21(f) + \left(\frac{Z_i}{Z_i + Z_n} \right) \cdot A22(f) \right| \right]$$

Построим график зависимости:

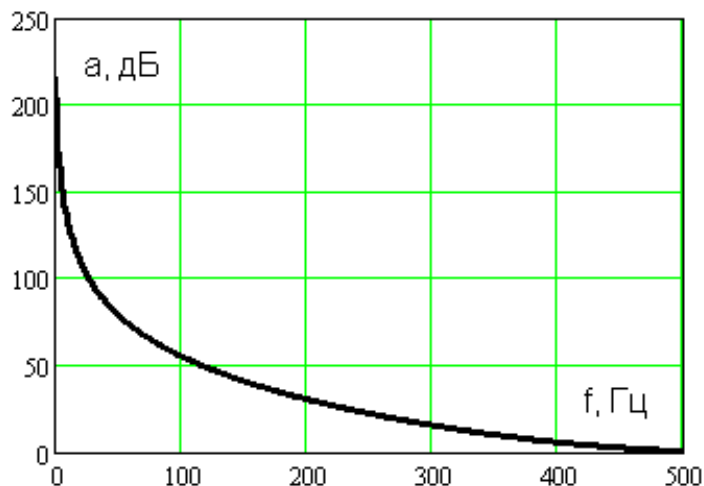


Рисунок 6.6

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задача 6.1. Сопротивления источника и поглотителя помех малы и точно не известны. Предложите схему фильтра ослабляющие сигналы частот выше 100 Гц. Полагая сопротивления источника и поглотителя равными 10 Ом, построить АЧХ системы.

Задача 6.2. Источник помех обладает сопротивлением $100+20j$ Ом, приемник помех – $2000+500j$ Ом. Источник помех генерирует в сеть помехи в частотном диапазоне 700-10000 Гц. Постройте

зависимость амплитуды напряжения помехи в приемнике в функции частоты. Построить зависимость амплитуды напряжения помехи в приемнике от частоты, введя между источником и приемником Т-фильтр верхних частот, определите коэффициент затухания фильтра на нижних частотах помехи.

Задача 6.3. Полагая что, в схемах фильтров рисунка 6.5 все конденсаторы имеют емкость 5 мкФ, а резисторы в ветвях с конденсаторами 100 Ом, индуктивности всех катушек 10 мГн постройте АЧХ фильтра без внешних цепей.

Задача 6.4. Полагая что, в схемах фильтров рисунка 6.5 все конденсаторы имеют емкость 5 мкФ, а резисторы в ветвях с конденсаторами 100 Ом, индуктивности всех катушек 10 мГн постройте АЧХ фильтра нагруженного на внешние сопротивления 10 Ом.

Задача 6.5. Построить АЧХ - фильтра предыдущей задачи при индуктивных нагрузках в $j5$ Ом.

ВОПРОСЫ

1. Что такое фильтры и для каких целей их используют?
2. Опишите мероприятия по снижению уровня помех, проникающих через информационные сети и силовые цепи.
3. Дайте классификацию окружающей среды по помехам, связанным с проводами. Приведите примеры.
4. Приведите типовую схему фильтра, используемого для подавления помех, идущих по проводам.
5. Какими параметрами оценивают эффективность фильтров?
6. Какие параметры учитывают при выборе фильтров?

7. ЭКРАНЫ И ИХ РАСЧЕТ

Цель занятия: дать понятие электромагнитных экранов, принципа их действия, коэффициента затухания, применения. Разобрать основные способы расчета коэффициента затухания. Научиться использовать метод Щелкунова при расчете экранирующего действия плоского экрана.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Различают следующие классы окружающей среды по помехам, вызванным электромагнитным излучением:

Класс 1. Низкий уровень - местные радиостанции находятся на расстоянии более 1 км, допускается наличие переговорных устройств малой мощности.

Класс 2. Средняя интенсивность электромагнитного излучения. Работаящие радиотелефоны должны располагаться на расстоянии более 1 м от чувствительных элементов.

Класс 3. Сильное радиоизлучение, вызванное радиотелефонами большой мощности в непосредственной близости от устройств.

Класс 4. Очень сильное излучение. Степень строгости контролируется по согласию между заказчиком и изготовителем.

Если (поглотитель) приемник находится в непосредственной близости от источника, в так называемой ближней зоне, то он воспринимает квазистатическое поле. В частности, штыревая антенна создает квазистатическое электрическое поле, а рамочная квазистатическое магнитное поле. Расстояние R от источника до рассматриваемой точки для ближней зоны: $R \ll \frac{\lambda}{2\pi}$, где λ - длина электромагнитной волны.

Волновое сопротивление среды в ближней зоне зависит от расстояния до источника излучения $Z_{-он} = j \cdot Z_0 \cdot \frac{2\pi \cdot R}{\lambda}$, где $Z_0 = 377$ Ом волновое сопротивление вакуума.

На большом расстоянии от антенны приемник находится в так называемой дальней зоне, где на него воздействует переменное электромагнитное поле. В этом случае волновое сопротивление составляет 377 Ом.

Помехоподавление характеризует степень защитного воздействия электромагнитного экрана, оно чаще всего указывается в

функции частоты в децибелах или неперах это, так называемый, коэффициент экранирования:

$$\mathcal{E} = 20 \cdot \lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right), \quad \mathcal{H} = 20 \cdot \lg\left(\frac{H_1}{H_2}\right). \quad (7.1)$$

Величины E и H в случае переменного электромагнитного поля связаны между собой посредством волнового сопротивления среды:

$$\underline{Z}: E/H = \underline{Z} = \sqrt{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 / \mu \cdot \mu_0}. \quad (7.2)$$

Аналитический расчет экранирующего действия электромагнитных экранов требует решения уравнений Максвелла для областей внутри и вне экрана, а также в самой его стенке. Для быстрых практических оценок Щелкунов разработал простой способ определения коэффициента затухания. Общий коэффициент затухания электромагнитного экрана состоит из коэффициента затухания вследствие отражения на граничных плоскостях P , коэффициента затухания из-за поглощения в стенке экрана Π (переход энергии электромагнитного поля в тепло), корректирующего коэффициента B , учитывающего многократные волны отражения внутри экрана: $\mathcal{E} = P + \Pi + B$.

Расчет каждого из компонентов затухания.

Коэффициент затухания вследствие отражения. Этот коэффициент состоит из двух составляющих, они обусловлены двумя граничными плоскостями - снаружи и внутри экрана. При условии, что волновое сопротивление внешней области $Z_{ВШ}$ значительно больше волнового сопротивления материала стенки экрана $Z_{Э}$ большая часть энергии, приходящейся на граничную плоскость снаружи экрана отражается обратно к источнику. Отношение напряженностей электромагнитного поля падающей и прошедшей волн определяется формулой:

$$\frac{E_{ВШ}}{E_{ЭВШ}} = \frac{(Z_{ВШ} + Z_{Э})}{2 \cdot Z_{Э}}. \quad (7.3)$$

Аналогичным образом это отношение определится и на внутренней стенке экрана - на внутреннем пограничном слое. Суммарное влияние отражения можно получить из соотношения:

$$\frac{E_{ВШ}}{E_{ВН}} = \frac{(Z_{ВШ} + Z_{Э})^2}{4 \cdot (Z_{Э} + Z_{ВШ})} \quad (7.4)$$

Введем обозначение $K = Z_{ВШ}/Z_{Э}$, тогда эта формула принимает

$$\text{вид: } \frac{E_{ВШ}}{E_{ВН}} = \frac{(1 + K)^2}{4 \cdot K} \quad (7.5)$$

Переходя к логарифмическим характеристикам, получаем выражение для коэффициента затухания вследствие отражения:

$$P_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg \frac{|(1 + K)^2|}{4 \cdot |K|} \quad (7.6)$$

Для его определения необходимо знать волновые сопротивления.

Волновое сопротивление в пространстве источника помехи для дальней зоны $Z_{ВШ}=Z_0=377$ Ом, для ближней зоны в высокоомных полях:

$$Z_{ВШ} = Z_0 \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{0.018}{r \cdot f} \quad (7.7)$$

в низкоомных полях:

$$Z_{ВШ} = Z_0 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} = 7.9 \cdot 10^{-6} \cdot r \cdot f \quad (7.8)$$

Волновое сопротивление стенки экрана:

$$Z_{\dot{Y}} = \sqrt{\frac{i \cdot \omega \cdot \mu}{(\sigma + i \cdot \omega \cdot \varepsilon)}} \quad (7.9)$$

а при условии, что толщина стенки больше глубины проникновения:

$$Z_{\dot{Y}} = \sqrt{\frac{i \cdot \omega \cdot \mu}{\sigma}} . \quad (7.10)$$

Выразим коэффициенты затухания вследствие отражения через параметры материала экрана и частоту:

$$P_{\text{дБ}} = 108 - 10 \cdot \lg \frac{\mu \cdot f}{\sigma_r} - \text{дальняя зона}; \quad (7.11)$$

$$P_{\text{дБ}} = 142 - 10 \cdot \lg \frac{\mu \cdot f^3 \cdot r^2}{\sigma_r} - \text{электрическое поле в ближней зоне}; \quad (7.12)$$

$$P_{\text{дБ}} = 75 - 10 \cdot \lg \frac{\mu}{f \cdot \sigma_r \cdot r^2} - \text{магнитное поле в ближней зоне}. \quad (7.13)$$

где r - расстояние от источника помехи, м;

f - частота, МГц;

σ_r - относительная удельная электропроводность, за базовую принята электропроводность меди:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{5.8 \cdot 10^7} .$$

Коэффициенты затухания вследствие поглощения Π описывают экспоненциальное ослабление падающей волны при прохождении стенки экрана толщиной d :

$$\frac{E_{\text{ЭВШ}}}{E_{\text{ЭВН}}} = e^{\alpha \cdot d} . \quad (7.14)$$

В логарифмических величинах получаем:

$$\Pi_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg \frac{E_{\text{ЭВШ}}}{E_{\text{ЭВН}}} . \quad (7.15)$$

Учитывая, что $\alpha = \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}$ получаем для коэффициента затухания вследствие поглощения:

$$\Pi_{\text{дБ}} = 1314d \cdot \sqrt{f \cdot \mu \cdot \sigma_r},$$

где μ и σ_r - относительная магнитная проницаемость и относительная удельная электропроводность соответственно, частота f выражена в МГц.

Коррекция коэффициента затухания при многократном отражении B волны в стенке экрана осуществляется на основании формулы:

$$B_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg \left| 1 - \frac{(K-1)^2}{(K+1)^2} \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} \right|, \quad (7.16)$$

где $\gamma = (1+i) \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}$ - комплексный коэффициент распространения.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пример решения задачи. Рассчитать коэффициент экранирования плоского металлического экрана толщиной 0.05 мм на частоте 10^5 Гц в ближней и дальней зонах излучателя помех. Проводимость материала экрана $5.8 \cdot 10^8$ См/м, относительная магнитная проницаемость 100.

Решение. Вводим данные:

$$\sigma := 5.8 \cdot 10^7 \quad f := 0.1 \cdot 10^6 \quad \mu := 100 \quad d := 0.05 \quad i := \sqrt{-1} \quad \epsilon := 1$$

Определяем относительную проводимость материала и глубину проникновения волн в него:

$$\sigma_r := \frac{\sigma}{5.8 \cdot 10^7} \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^6 \quad \delta := \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma_r \cdot 10^{-6}}} \quad \delta = 0.178$$

Определяем волновое сопротивление материала стенки экрана:

$$Z_e := \sqrt{i \omega \cdot \frac{\mu}{\sigma}} \quad Z_e = 735.971 + 735.971i \quad Z := 377$$

Находим волновое сопротивление пространства в ближней зоне излучателя:

$$Z_d := 377 \quad Z_{bm} := 7.9 \cdot 10^{-6} \cdot r \cdot f \quad Z_{bm} = 188.599$$

Определяем коэффициент затухания экрана вследствие отражения в дальней зоне:

$$P1 := 108 - 10 \cdot \log \left(\mu \cdot \frac{f \cdot 10^{-6}}{\sigma r} \right) \quad P1 = 98$$

в ближней зоне:

$$Pbe := 142 - 10 \cdot \log \left[\mu \cdot (f \cdot 10^{-6})^3 \cdot \frac{r^2}{\sigma r} \right] \quad Pbe = 104.442$$

Определяем коэффициент затухания вследствие поглощения в стенке экрана:

$$\Pi := 131.4 \cdot d \cdot \sqrt{f \cdot \mu \cdot \sigma} \quad \Pi = 2.078 \times 10^4 \quad db := 0.001 \quad fb := 1 \quad \bar{I} := \left(0.1314 \cdot \frac{d}{db} \right) \cdot \sqrt{\mu \cdot \sigma} \cdot \sqrt{\frac{f}{fb}} \quad \bar{I} = 2.078 \times 10^4$$

Находим корректирующий коэффициент:

$$B := 20 \cdot \log \left(\left| 1 - e^{-2 \cdot d \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} \cdot 10^{-6}} \cdot e^{i \cdot 2 \cdot d \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} \cdot 10^{-6}} \right| \right) \quad B = 0.417$$

Общий коэффициент затухания в дальней и ближней зонах:

$$Ed := P1 + \Pi + B \quad Ed = 2.087 \times 10^4$$

$$Ebe := Pbe + \Pi + B \quad Ebe = 2.088 \times 10^4$$

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задача 7.1. Рассчитать коэффициент экранирования плоского металлического экрана толщиной 0,01 мм на частоте 10^3 Гц в ближней (излучение штыревой антенны на расстоянии $0,01\lambda$) и дальней зонах излучателя помех. Проводимость материала экрана $0,8 \cdot 10^8$ См/м, относительная магнитная проницаемость 200.

Задача 7.2. Рассчитать коэффициент экранирования плоского металлического экрана толщиной 0,02 мм на частоте 10^2 Гц в ближней (излучение рамочной антенны на расстоянии $0,03\lambda$) и дальней зонах излучателя помех. Проводимость материала экрана $0,1 \cdot 10^8$ См/м, относительная магнитная проницаемость 400.

Задача 7.3. Определите напряженность магнитного и электрического полей внутри экрана толщиной 0,01 мм на частоте 10^2 Гц в ближней зоне, на расстоянии $0,01\lambda$ от излучателя. Проводимость материала экрана $5,8 \cdot 10^8$ См/м, относительная магнитная проницаемость 2. Напряженность электрического поля в пространстве излучателя 0,1 В/м.

Задача 7.4. Определите напряженность магнитного и электрического полей внутри экрана толщиной 0,03 мм на частоте 10^3 Гц на расстоянии $0,1\lambda$ от источника излучения. Проводимость материала экрана $5,8 \cdot 10^8$ См/м, относительная магнитная проницаемость 2. Напряженность магнитного поля в пространстве излучателя 0,1 А/м.

ВОПРОСЫ

7.1. Опишите физический механизм связи посредством электромагнитного поля.

7.2. Дайте понятия дальней и ближней зон в пространстве излучателей электромагнитной энергии.

7.3. Что такое коэффициент экранирования, из каких компонент он складывается?

7.4. Опишите метод Щелкунова (полных сопротивлений) для расчета экранирующего действия плоского экрана.

7.5. Как находится волновое сопротивление в пространстве источника помех?

7.6. Как находится волновое сопротивление материала стенки экрана?

7.7. Как рассчитать коэффициент поглощения?

7.8. Как рассчитать коэффициент отражения?

7.9. Что такое корректирующий коэффициент, как его определить, в каких случаях им можно пренебречь?

7.10. Как определить напряженности полей в пространстве поглотителей, если известен коэффициент экранирования и напряженности полей на внешней стороне экрана?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шаталов, А.Ф.* Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебное пособие / А.Ф. Шаталов, И.Н. Воротников, И.И. Боровлев; Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь: АГРУС, 2012. – 200 с.
2. *Шваб Адольф.* Электромагнитная совместимость: Пер. с нем. В.Д. Мазина и С.А. Спектора/ Под ред. Кужекина. М.: Энергоатомиздат, 1995.
3. *Воротников, И. Н.* Исследование методов измерения электрической емкости на постоянном токе / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко // Методы и средства повышения эффективности технологических процессов АПК: сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции. – г. Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. Аграрного ун-та. – 2013. – С. 66 – 68.
4. *Воротников, И. Н.* Способы измерения электрической емкости по параметрам переходного процесса / И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. - № 10. – С. 60 – 65.
5. *Baraton R., Cahout J., Hutzler B.* Three dimensional computation of the electric fields induced in human body by magnetic fields. 8-ISH, Jokohama, 1993.
6. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Уч. пособие/ Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – Н. Новгород: НГТУ, 2004.
7. *Колечицкий Е.С.* Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
8. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений / Б.И. Давыдов, В.С. Тихончук, В.В. Антипов; Под ред. Ю.Г. Григорьева. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. *Шевель Д.М.* Электромагнитная безопасность: – К.: ВЕК+, 2002.

10. *Афанасьев А.А., Долотко В.И., Карнишин В.В. и др.* Обеспечение электромагнитной безопасности при эксплуатации компьютерной техники. – Фрязино.: Циклон-тест, 1999.
11. *Салтыков В.М., Салтыкова О.А., Салтыков А.В.* Влияние характеристик дуговых сталеплавильных печей на качество напряжения в системах электроснабжения. Под общ. ред. В.М. Салтыкова. – М.: Энергоатомиздат, 2006.
12. В. П. Бобров, В.Г. Гольдштейн, Ф.Х. Халилов. *Перенапряжения и защита от них в электрических сетях 110 – 750 кВ.* – М.: Энергоатомиздат, 2005.
13. ГОСТ 12.1.002-84. Система стандартов безопасности труда. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля.
14. ГОСТ 12.1.006-84. Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
15. ГОСТ 12.1.045-84. Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
16. VDE 0848-2 -92 (Нормы разработаны Немецким союзом электротехников – VDE, Германия).
17. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. Стандарт организации СО 34.35.311-2004. – М.: Издательство МЭИ, 2004.
18. *Салтыков В.М., Салтыкова О.А. и др.* Целесообразность учета электромагнитных излучений в экологическом состоянии городов. Сборник материалов IV Международной науч.-практ. конференции «Экономика, экология и общество России в 21-м столетии». – С. Петербург, СПбГТУ и МВШУ, 2002.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 - Нормы и рекомендации по электромагнитной совместимости

Рассматривая электромагнитную совместимость как показатель качества продукции, необходимо на различных этапах ее создания соблюдать целый ряд рекомендаций и норм, охватывающих комплекс непрерывно совершенствующихся вопросов электромагнитной совместимости [1].

В каждой стране существуют национальные комитеты, институты и т.д., разрабатывающие национальные нормы по электромагнитной совместимости. Они обычно тесно связаны с такими международными организациями как:

- Международная конференция по большим энергетическим системам (СИГРЭ);
- Международная совещательная комиссия телеграфной и телефонной службы (ССИТТ);
- Международный союз по производству и распределению электроэнергии (UNIPED);
- Международная электротехническая комиссия (МЭК) с техническим комитетом ТК 77;
- Европейский комитет по нормированию в области электротехники (CENELEC);
- Специальный международный комитет по радиопомехам (СИСР).

Связь между организациями, занимающимися нормированием электромагнитной совместимости, и области их деятельности приведены на рисунке 1.1.

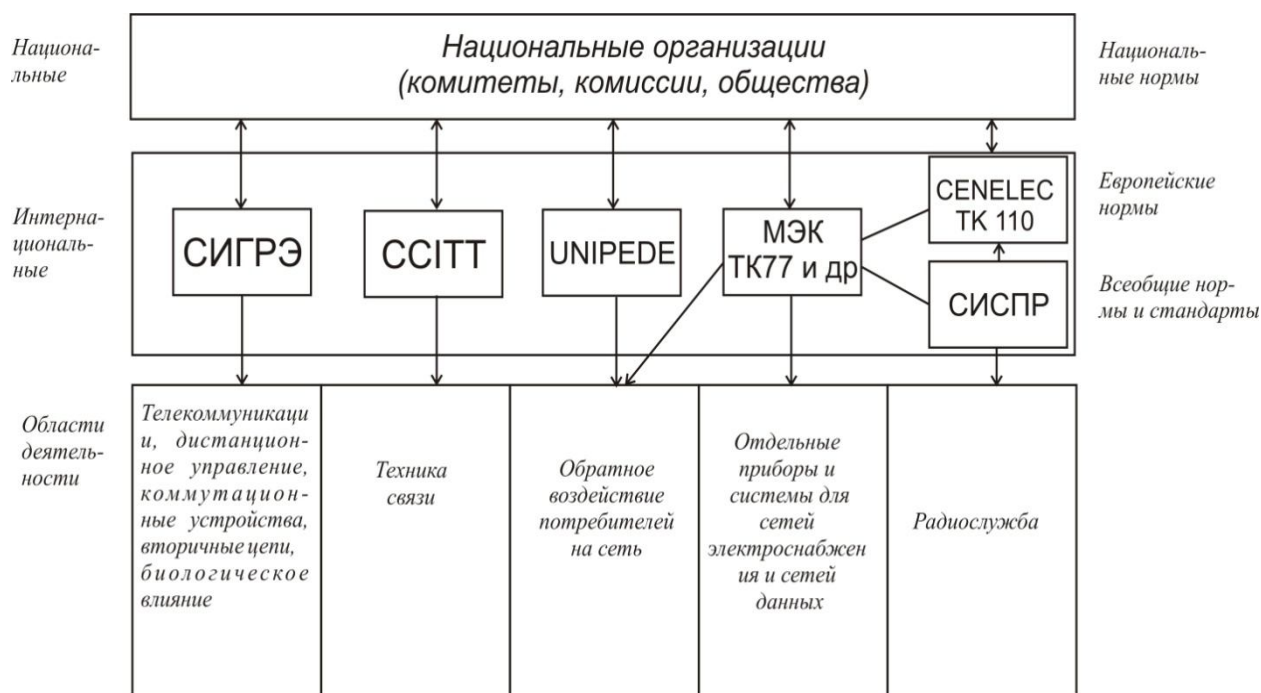


Рисунок 1.1 - Организации, занимающиеся нормированием электромагнитной совместимости, и области их деятельности

Вопросами влияния потребителей на сети электроснабжения занимаются организации UNIPEDÉ и МЭК. МЭК рассматривает также различные электротехнические устройства и системы, сети электроснабжения, линии передачи данных. Технические комитеты CENELEC и СИСПР анализируют проблемы искрения, разрабатывают европейские и мировые рекомендации и нормы по электромагнитной совместимости. Основная тематика ССИТТ это техника связи. СИГРЭ занимается проблемами техники связи, телемеханики, распределительных устройств, вторичной коммутации, биологического влияния высоких напряжений [12, 13, 14, 15, 16, 17].

Целевыми объектами работ в области электромагнитной совместимости, относящимися к электроэнергетике и технике автоматизации процессов, являются:

- терминология, т.е. точно сформулированные понятия и определения, необходимые для осмысленных разработок и использования норм;

- уровень электромагнитной совместимости и классификация окружающей обстановки по значениям помех, служащих в качестве основы при установлении требований по помехоустойчивости

промышленных средств и в качестве меры допустимого излучения помех;

- допустимые значения излучения помех и обратного действия, вызываемого приборами определенных классов;

- классы помехоустойчивости промышленных средств при определенных электромагнитных воздействиях;

- способы и устройства для измерения помех и иных параметров, относящихся к электромагнитной совместимости;

- способы испытаний и устройства для тестирования;

- отображение в технической документации помех, помехозащищенности и излучения помех промышленными средствами;

- указания по хранению, транспортировке и обращению с электронными компонентами, деталями и приборами, например, в целях предотвращения их повреждений из-за разрядов статического электричества;

- правила оформления разработки и конструкции приборов с учетом их электромагнитной совместимости;

- инструкции по оснащению и сооружению устройств и зданий, обладающих электромагнитной совместимостью;

- программное содержание работ по электромагнитной совместности, т.е. рекомендации по отдельным этапам работы на стадиях проектирования продукции или проработки проблем электромагнитной совместности;

- параметры специальных деталей и материалов, используемых при разрешении проблем электромагнитной совместности (разрядники, помехоподавляющие элементы, фильтры, экранные и непроницаемые для высоких частот материалы, проводящие лакокрасочные покрытия, материалы для полов и т.п.).

Особо следует отметить направления деятельности технического комитета ТК 77 МЭК «Электромагнитная совместимость электрооборудования, включая сети» по вопросам стандартизации электромагнитной совместности:

1. Общие вопросы: общее рассмотрение, определения, терминология.

2. Электромагнитная окружающая обстановка: описание окружающей электромагнитной обстановки, классификация окружающей обстановки, уровни электромагнитной совместимости.

3. Допустимые значения: допустимые значения излучения помех, допустимые значения помехоустойчивости.

4. Способы испытаний и измерений: способы измерений, способы испытаний.

5. Рекомендации по оснащению устройств и защитные мероприятия: рекомендации по оснащению, защитные мероприятия и устройства.

9. Разное.

Технический комитет ТК 77 МЭК также занимается общими аспектами электромагнитной совместимости. Главной его задачей является разработка базисных документов применительно к электрическим сетям, системам автоматизации и представляющим для них интерес приборам и устройствам, в которых необходимо учитывать специфические процессы, связанные с электромагнитной совместимостью [12, 13, 14, 15, 16, 17].

Приложение 2 - Государственные стандарты и нормы в области электромагнитной безопасности

Таблица 2.1

**Государственные стандарты РФ
в области электромагнитной безопасности**

Обозначение	Наименование
ГОСТ 12.1.002-84	Система стандартов безопасности труда. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряжённости и требования к проведению контроля
ГОСТ 12.1.006-84	Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля
ГОСТ 12.1.045-84	Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля

Таблица 2.2.

**Санитарные нормы и правила для условий профессионального
облучения электромагнитными полями**

Обозначение	Наименование	Примечание
СанПиН 2.2.4/ 2.1.8.055-96	Санитарные правила и нормы. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ).	УТВ.08.05.96 ГКСЭН
СанПиН 2.2.2.542-96	Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.	УТВ.14.07.96 ГКСЭН
ГН 2.1.8./2.2.4.019- 94	Гигиенические нормативы. Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой связи.	УТВ.27.12.94 ГКСЭН
<i>ОБУВ № 5060- 89</i>	Ориентировочные безопасные уровни воздействия переменных магнитных полей частотой 50Гц при производстве работ под напряжением на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи напряжением 220-1150 кВ.	УТВ.28.09.89 МЗ СССР
СН № 5802-91	Санитарные нормы и правила выполнения работ в условиях воздействия электрических полей промышленной частоты (50 Гц).	УТВ.31.06.91 МЗ СССР
СанПиН 2.2.4.723-98	Переменные магнитные поля промышленной частоты (50 Гц) в производственных условиях.	УТВ.13.11.98 МЗ РФ
ПДУ № 3206-85	Предельно – допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц.	УТВ.17.01.85 МЗ СССР
<i>ПДУ № 1742-77</i>	Предельно-допустимые уровни воздействия постоянных магнитных полей при работе с магнитными устройствами и магнитными материалами.	УТВ.16.08.77 МЗ СССР

**Санитарные нормы и правила для условий
непрофессионального облучения (население)**

Обозначение	Наименование	Примечание
ГН 2.1.8./2.2.4.019- 94	Гигиенические нормативы. Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой связи.	Утв.27.12.94. ГКСЭН
СН № 2971-84	Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты.	Утв.28.02.84. МЗ СССР
СанПиН 2.2.2.542-96	Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.	Утв.14.07.96. ГКСЭН
МСанПиН 001- 96	Межгосударственные санитарные нормы допустимых уровней физических факторов при применении товаров народного потребления в бытовых условиях.	Утв.19.01.96. ГКСЭН
СанПиН 2.2.4/2.1.8.055- 96	Санитарные правила и нормы. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ).	Утв.08.05.96. ГКСЭН
СН № 2666-83	Предельно допустимые уровни плотности потока энергии, создаваемой микроволновыми печами.	1983 г.
СН № 2550-82	Предельно допустимые нормы напряженности электромагнитного поля, создаваемого индукционными бытовыми печами, работающими на частоте 20 – 22 кГц.	1982 г.

**Предельно допустимые уровни электромагнитного поля
для потребительской продукции, являющейся источником ЭМП**

Источник	Диапазон	Значение ПДУ	Примечание
Индукционные печи	20 – 22 кГц	500 В/м 4 А/м	Условия измерения: расстояние 0,3 м от корпуса.
СВЧ печи	2,45 ГГц	10 мкВт/см ²	Условия измерения: расстояние 0,50...0,05 м от любой точки, при нагрузке 1 литр воды.
Видеодисплей ный терминал ПЭВМ	5 Гц – 2 кГц	$E_{пду} = 25 \text{ В/м}$ $B_{пду} = 250 \text{ нТл}$	Условия измерения: расстояние 0,5 м вокруг монитора ПЭВМ.
	2 – 400 кГц	$E_{пду} = 2,5 \text{ В/м}$ $B_{пду} = 25 \text{ нТл}$	
	поверхностный электростатический потенциал	$V = 500 \text{ В}$	Условия измерения: расстояние 0,1 м от экрана монитора ПЭВМ.
Прочая продукция	50 Гц	$E = 500 \text{ В/м}$	Условия измерения: расстояние 0,5 м от корпуса изделия.
	0,3 – 300 кГц	$E = 25 \text{ В/м}$	
	0,3 – 3 МГц	$E = 15 \text{ В/м}$	
	3 – 30 МГц	$E = 10 \text{ В/м}$	
	30 – 300 МГц	$E = 3 \text{ В/м}$	
	0,3 – 30 ГГц	ППЭ = 10 мкВт/см ²	

Таблица 2.5

Временно допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой радиосвязи, непрофессиональное воздействие

Категория облучения	Величина ВДУ ЭМИ	Примечание
Облучение населения, проживающего на прилегающей территории, от антенн базовых станций, расположенных на селитебной территории.	$ППЭ_{пду} = 10$ мкВт/см ²	
Облучение пользователей радиотелефонов.	$ППЭ_{пду} = 100$ мкВт/см ²	Условия измерения: Измерения ППЭ следует производить на расстоянии от источника ЭМИ, соответствующего расположению головы человека, подвергающегося облучению.

Таблица 2.6

Предельно допустимые уровни воздействия ЭМП, создаваемых радиотехническими объектами для основного населения

Источник	Диапазон частот	Значение ПДУ	Примечание
Радиотехнические объекты	30 – 300 кГц	25 В/м	Для всех случаев облучения
	0,3 – 3 МГц	15 В/м	
	3 – 30 МГц	10 В/м	
	30 – 300 МГц	3 В/м	
	300 МГц – 300 ГГц	10 мкВт/см ²	

Таблица 2.7

Границы санитарно-защитных зон для ЛЭП согласно СН № 2971-84

Напряжение ЛЭП	330 кВ	500 кВ	750 кВ	1150 кВ
Размер санитарно-защитной (охранной) зоны	20 м	30 м	40 м	55 м

Таблица 2.8

Допустимые уровни воздействия электрического поля ЛЭП на население

ПДУ, Е, кВ/м	Условия облучения
0,5	Внутри жилых зданий
1,0	На территории зоны жилой застройки
5,0	В населенной местности вне зоны жилой застройки; (земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет, пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселков городского типа в пределах поселковой черты и сельских населенных пунктов в пределах черты этих пунктов) а также на территории огородов и садов;
10,0	На участках пересечения воздушных линий электропередачи с автомобильными дорогами 1 – IV категорий;
15,0	В ненаселенной местности (незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта, и сельскохозяйственные угодья);
20,0	В труднодоступной местности (недоступной для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населения.

Таблица 2.9

Допустимые уровни напряжённости магнитного и электрического полей

Частота	Напряжённость магнитного поля, А/м	Частота	Напряжённость электрического поля, В/м
50 Гц	80	50 Гц	5000
1-12 кГц	50	0.06-3 МГц	50
0,06-3 МГц	5	3-30 МГц	20
30-50 МГц	0,3	30-50 МГц	10

Приложение 3 - Единицы измерения в системе СИ

Таблица 3.1

Название и обозначение величины		Единица измерения	Обозначение		Формула
			русское	международное	
Сила электрического тока	I	ампер	А	А	I
Термодинамическая температура	T	кельвин	К	К	T
Частота	f	герц	Гц	Hz	$f = 1/t$
Скорость	v		м/с	m/s	$v = dL/dt$
Угловая скорость	ω		рад/с	rad/s	$\omega = d\phi/dt$
Угловое ускорение	ε		рад/с ²	rad/s ²	$\varepsilon = d^2\phi/dt^2$
Сила	F	ньютон	Н	N	$F = ma$
Давление	P	паскаль	Па	Pa	$P = F/S$
Работа, энергия	A	джоуль	Дж	J	$A = F \cdot L$
Импульс	p		кг·м/с	kg·m/s	$p = m \cdot v$
Мощность	P	ватт	Вт	W	$P = A/t$
Электрический заряд	q	кулон	Кл	C	$q = I \cdot t$
Электрическое напряжение, электрический потенциал	U	вольт	В	V	$U = A/q$
Напряжённость электрического поля	E		В/м	V/m	$E = U/L$
Электрическое сопротивление	R	ом	Ом	Ω	$R = U/I$
Электрическая ёмкость	C	фарад	Ф	F	$C = q/U$
Магнитная индукция	B	тесла	Тл	T	$B = F/I \cdot L$
Напряжённость магнитного поля	H		А/м	A/m	
Магнитный поток	Φ	вебер	Вб	Wb	$\Phi = B \cdot S$
Индуктивность	L	генри	Гн	H	$L = U \cdot dt/dI$

ОГЛАВЛЕНИЕ:

1	Определение взаимных индуктивностей и емкостей.....	3
2	Уровни помех. Использование ЭМС - номограммы при описании помех.....	7
	2.1 Уровни и интервалы помех.....	7
	2.2 ЭМС – номограмма.....	10
3	Расчет гальванической связи.....	17
	3.1 Гальваническая связь.....	17
	3.2 Противофазные и синфазные помехи.....	20
4	Расчет индуктивной связи.....	26
5	Расчет емкостной связи.....	30
6	Пассивные помехозащитные устройства.....	35
7	Экраны и их расчет.....	40
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	48
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	50
	<i>Приложение 1.</i> Нормы и рекомендации по электромагнитной совместимости	50
	<i>Приложение 2 .</i> Государственные стандарты и нормы в области электромагнитной безопасности.....	54
	<i>Приложение 3.</i> Единицы измерения в системе СИ.....	60