

Утверждаю  
Декан ЭФФ



Г.С. Евтушенко

«07» апреля 2008 г.

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ТЕХНИКИ**

**Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Современные проблемы электроэнергетики» для магистрантов,  
обучающихся по направлению 140200 «Электроэнергетика»**

***Составитель Д.В. Жгун***

Издательство  
Томского политехнического университета  
2008

УДК 621.31.027.3:537.813(07)

ББК 31.24я7

Ж41

**Ж41 Электромагнитная совместимость высоковольтной техники:**  
методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Современные проблемы электроэнергетики» для магистрантов, обучающихся по направлению 140200 «Электроэнергетика» / сост. Д.В. Жгун. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 52 с.

ISBN 5-98298-205-9

УДК 621.31.027.3:537.813(07)

ББК 31.24я7

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры техники и электрофизики высоких напряжений «13» марта 2007 г.

Зав. кафедрой ТЭВН  
доктор физ.-мат. наук,  
профессор



*В.В. Лопатин*

Председатель  
учебно-методической комиссии



*С.А. Лопаткин*

*Рецензент*

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий лабораторией НИИ ВН при ТПУ  
*Г.Е. Ремнёв*

ISBN 5-98298-205-9

© Жгун Д.В., составление, 2008

© Составление. Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2008

# **1. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ, СОЗДАВАЕМОГО УСТАНОВКАМИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Цель работы: изучить допустимые нормы напряженности электрического поля промышленной частоты, ознакомиться с применением измерителя напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50. Измерить напряженность электрического поля в высоковольтной лаборатории и вблизи линии высокого напряжения.

## **Введение**

Электрические сети высокого напряжения оказывают неблагоприятное воздействие на техно- и биосферу. Напряжения и токи в проводах линий электропередач создают электромагнитные поля в пространстве и блуждающие токи в земле. Вследствие этого могут возникнуть мешающие, и даже опасные влияния на биосферу. Опасное воздействие на персонал и население оказывают электрические и магнитные поля промышленной частоты (50 Гц). Воздушные линии электропередачи создают в окружающем пространстве электрическое поле, напряженность которого снижается по мере удаления от них. Электротехнический персонал подвергается воздействию электромагнитного поля, что может неблагоприятно сказываться на состоянии здоровья. Поэтому нормирование воздействия электромагнитного поля является важной задачей для обеспечения безопасности работ в электроустановках, посредством технических и организационных мероприятий.

## **Электрическое поле промышленной частоты. Общие сведения**

Источником электрических полей промышленной частоты (ЭП ПЧ) являются токоведущие части действующих электроустановок, находящиеся под напряжением (линии электропередач, генераторы, трансформаторы и др.).

Электрическое поле вблизи ВЛ (воздушной линии) может оказывать вредное воздействие на человека. Различают следующие виды воздействия:

1) непосредственное (прямое) воздействие, проявляющееся при пребывании в электрическом поле. Эффект этого воздействия усиливается с увеличением напряженности поля и времени пребывания в нем. Длительное воздействие электрического поля на организм человека может вызвать нарушение функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем. Это выражается в повышенной утомляемости,

снижении качества выполнения рабочих операций, болях в области сердца, изменении кровяного давления и пульса;

2) косвенное воздействие:

- электрических разрядов (импульсного тока), возникающих при прикосновении человека изолированного от земли, к растениям, заземленным конструкциям и другим заземленным объектам;
- электрических разрядов (импульсного тока), возникающих при прикосновении человека к изолированным от земли конструкциям, корпусам машин и механизмов на пневматическом ходу;
- воздействие тока, проходящего через человека, находящегося в контакте с изолированными от земли объектами – крупногабаритными предметами, машинами и механизмами, протяженными проводниками – тока стекания.

Кроме того, электрическое поле может стать причиной воспламенения или взрыва паров горючих материалов и смесей в результате возникновения электрических разрядов при соприкосновении предметов или людей с машинами и механизмами.

Степень опасности каждого из указанных факторов возрастает с увеличением напряженности электрического поля.

Нормы на предельно допустимые напряженности электрического поля (ЭП) на промышленной частоте для персонала установлены в Сан-ПиН 2.2.4.1191–03:

- $E \geq 25$  кВ/м – пребывание в ЭП без средств защиты не допускается;
- $20 < E < 25$  кВ/м пребывание в ЭП не более 10 мин;
- при  $5 < E \leq 20$  кВ/м допустимое время пребывания в ЭП вычисляют как:

$$T, \text{ часов} = (50/E) - 2 \quad (1)$$

где  $E$  – напряженность ЭП в контролируемой зоне, кВ/м;  $T$  – допустимое время пребывания в ЭП при соответствующем уровне напряженности, У.

- $E \leq 5$  кВ/м пребывание в ЭП допускается в течение полного рабочего дня.

Допустимое время пребывания в ЭП может быть реализовано одноразово или дробно в течение рабочего дня. В остальное рабочее время необходимо находиться вне зоны влияния ЭП или применять средства защиты.

Время пребывания персонала в течение рабочего дня в зонах с различной напряженностью ЭП ( $T_{пр}$ ) вычисляют по формуле:

$$T_{\text{до}} = 8 \cdot \left( \frac{t_1}{T_{E1}} + \frac{t_2}{T_{E2}} + \dots + \frac{t_i}{T_{Ei}} \right), \quad (2)$$

где  $T_{np}$  – приведенное время, эквивалентное по биологическому эффекту пребыванию в ЭП нижней границы нормируемой напряженности;

$t_{E1}, t_{E2}, \dots, t_{En}$  – время пребывания в контролируемых зонах с напряженностью  $E_1, E_2, \dots, E_i$ , ч;

$T_{E1}, T_{E2}, \dots, T_{En}$  – допустимое время пребывания для соответствующих контролируемых зон.

Приведенное время не должно превышать 8 ч.

Количество контролируемых зон определяется перепадом уровней напряженности ЭП на рабочем месте. Различие в уровнях напряженности ЭП контролируемых зон устанавливается 1 кВ/м.

Электрические поля линий электропередач также воздействуют на население. Существует определенная вероятность ошибок при проектировании и расположении питающих сетей в районах массовой застройки или разводки сетей в пределах дома (как правило, первый этаж). Первый признак превышения норм по этому показателю – частые сбои при работе бытовой техники: помехи на экранах телевизоров, мониторов персональных компьютеров, радиопомехи. Для населения существуют следующие уровни воздействия электрического поля промышленной частоты (табл. 1).

Предельно допустимые значения напряженности нормируются для электрического поля, не искаженного присутствием человека. Поэтому напряженность электрического поля определяется на высоте 1,8 м от уровня земли, а для помещений – от уровня пола.

В целях защиты населения от воздействия электрического поля ВЛ устанавливаются санитарно-защитные зоны. Санитарно-защитной зоной является территория вдоль трассы ВЛ, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м. Для вновь проектируемых ВЛ, а также зданий и сооружений, допускается принимать границы санитарно-защитных зон вдоль трассы ВЛ с горизонтальным расположением проводов и без средств снижения напряженности электрического поля по обе стороны от нее на следующих расстояниях от проекции на землю крайних фазных проводов в направлении, перпендикулярном ВЛ: 20 м – для ВЛ напряжением 330 кВ; 30 м – 500 кВ; 40 м – 750 кВ; 55 м – 1150 кВ.

В пределах санитарно-защитной зоны запрещается:

- размещение жилых и общественных зданий и сооружений, площадок для стоянки и остановки всех видов транспорта, предприятий по обслуживанию автомобилей и складов нефти и нефтепродуктов;
- производство операций с горючим, выполнение ремонта машин и механизмов;

Таблица 1

*Допустимые уровни напряженности электрического поля  
промышленной частоты для населения*

Е <sub>пду</sub> , кВ/м	Тип местности
0,5	внутри жилых зданий
1	территория зоны жилой застройки
5	населенная местность 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	участки пересечения ВЛ с автомобильными дорогами I–IV категории
15	ненаселенная местность (незастроенные местности, часто посещаемые людьми, доступные для транспорта, и сельскохозяйственные угодья)
20	труднодоступная местность (не доступная для транспорта и сельскохозяйственных машин) и участки, специально выгороженные для исключения доступа населения)

### **Меры защиты персонала от воздействия электрического поля**

Если напряженность электрического поля превышает предельно допустимые уровни, должны быть приняты меры по ее снижению. В местах возможного пребывания человека напряженность электрического поля может быть уменьшена путем удаления жилой застройки от ВЛ, применением экранирующих устройств и других средств снижения напряженности электрического поля. Основными видами средств коллективной защиты от воздействия электрического поля токов промышленной частоты являются экранирующие устройства – составная часть электрической установки, предназначенная для защиты персонала в открытых распределительных устройствах и на воздушных линиях электропередач.

Экранирующее устройство необходимо при осмотре оборудования, оперативном переключении, наблюдении за производством работ. Конструктивно экранирующие устройства оформляются в виде козырьков, навесов или перегородок из металлических канатов, прутков, сеток.

Переносные экраны также используются при работах по обслуживанию электроустановок в виде съемных козырьков, навесов, перегородок, палаток и щитов. Экранирующие устройства должны иметь антикоррозионное покрытие и быть заземлены.

## **Способы ограничения напряженности поля под воздушными линиями высших классов напряжения**

Наиболее простым конструктивным способом ограничения напряженности поля под линиями является установка заземленных тросов под проводами линий. Габарит до земли нормируется с учетом необходимости обеспечения безопасности перемещения под линиями различных механизмов высотой до 4...4,5 м. Поэтому, если высота троса в месте его максимального провеса не будет превышать 4...4,5 м, высота подвески проводов над землей не изменится. Наведенные на заземленных тросах заряды частично компенсируют поле проводов линии и ограничивают напряженность поля. Более эффективна подвеска двух тросов, разнесенных в горизонтальной плоскости, под каждым проводом линии. На заземленных тросах наводятся заряды, знак которых противоположен знаку заряда соответствующего провода.

Следует заметить, что подвеска дополнительных тросов приводит к заметному удорожанию линии. Согласно экономическим расчетам более целесообразно увеличивать высоту подвески провода, поэтому тросовые экраны применяются только при пересечениях линией дорог. При этом они натягиваются между дополнительными железобетонными стойками.

Ограничение напряженности поля под линиями электропередачи может быть достигнуто без изменения конструкции линии при использовании растительного массива под линиями. Стволы и ветки деревьев, кустарников имеют высокую проводимость в течение всего года. Погонное сопротивление составляет 1...3,5 МОм/м при положительных температурах и 100...500 МОм/м при отрицательных температурах. В связи с этим при высоте древесно-кустарниковой растительности под проводами 4 м, напряженность поля не превышает 1 кВ/м при отрицательных температурах и 0,01 кВ/м при положительных температурах. Это обеспечивает полную экологическую безопасность людей и животных под линиями.

## **Расчет напряженности электрического поля под линией высокого напряжения**

Электрическое поле в рассматриваемой точке пространства (рис. 1) имеет горизонтальную ( $E_x$ ) и вертикальную ( $E_y$ ) составляющие. Потенциал человека относительно земли, а также ток, протекающий через человека, определяются вертикальной составляющей напряженности поля, которая определяется с учетом зарядов всех проводов линии и их отражений в поверхности земли. Нормированные напряженности элек-

трического поля под ВЛ определяются на уровне головы человека (1,8 м над поверхностью земли). В общем случае провода ВЛ могут располагаться на различной высоте над поверхностью земли. В расчетах принимают, что рабочие емкости фаз равны между собой и пренебрегают активными проводимостями крайних фаз. Кроме этого, определяют распределение напряженности для моментов времени, соответствующих максимуму зарядов на одной из фаз. В этом случае

$$q_1 = q; q_2 = q_3 = -0,5q.$$

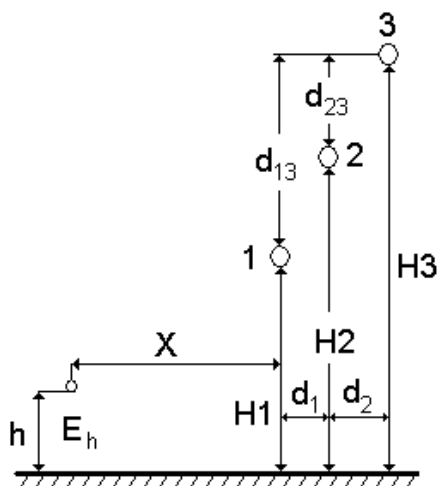


Рис. 1.1. Расчетная схема расположения линейных зарядов на линии

С учетом этих допущений можно записать, что напряженность под линией на расстоянии  $X$  от нижней фазы (рис. 1) определяется как

$$\begin{aligned} \dot{A}_h = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \left( \frac{H1-h}{X^2 + (H1-h)^2} + \frac{H1+h}{X^2 + (H1+h)^2} \right) - 0,5 \left( \frac{H2-h}{(X+d_1)^2 + (H2-h)^2} + \frac{H2+h}{(X+d_1)^2 + (H2+h)^2} \right) - \right. \\ \left. - 0,5 \left( \frac{H3-h}{(X+d_2)^2 + (H3-h)^2} + \frac{H3+h}{(X+d_2)^2 + (H3+h)^2} \right) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $q$  – линейный заряд на проводе, Кл/м;

$H1, H2, H3$  – средняя высота подвеса проводов в каждой фазе, м;

$d_{12}, d_{23}, d_{13}$  – расстояние между проводами, м;

$d_1, d_2$  – расстояние между проекциями средней и верхней фаз до нижней фазы, м.

$h = 1,8$  м – высота на которой рассчитывается напряженность электрического поля.

Линейный заряд на проводе рассчитывается как

$$q = \frac{C \cdot U}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где  $U$  – класс напряжения ВЛ, В;



$C$  – емкость фазы на единицу длины, Ф/м.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{S}{r}\right)}, \quad (5)$$

где  $r$  – радиус провода, м;

$S$  – среднегеометрическое расстояние между фазами, м.

$$S = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}. \quad (6)$$

Высота провода над поверхностью земли определяется как:

$$H = H_n - m \cdot H_{из} - \frac{2}{3} f, \quad (7)$$

где  $H_n$  – высота точки крепления провода на опоре, м;

$m$  – число изоляторов в гирлянде;

$H_{из}$  – строительная высота изолятора, м;

$f$  – стрела провеса провода в пролете, м.

Для двухцепных линий с вертикальным расположением проводов напряженность поля в рассматриваемой  $E_h$  точке можно рассчитать по формуле

$$E_h = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}, \quad (8)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – напряженность электрического поля в расчетной точке от каждой цепи линии.

### Аппаратура для измерения

Измеритель напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50 (рис. 2) предназначен для измерения среднеквадратичного значения напряженности электрического поля промышленной частоты, возбуждаемого вблизи электроустановок высокого напряжения в диапазоне от 0,01 до 100 кВ/м. Измеритель состоит из антенны-преобразователя (АП) ЕЗ-50 и устройства отсчетного УОЗ-50. АП типа ЕЗ-50 представляет собой симметричную дипольную антенну электрически малых размеров (полный размер диполя 100 мм). Работа прибора основана на возбуждении в АП под воздействием измеряемого поля переменного напряжения с той же частотой и пропорционального напряженности поля. Устройство отсчетное УОЗ-50 преобразует аналоговый сигнал, поступающий с АП, в цифровой сигнал и производит индикацию напряженности ЭП в абсолютных единицах кВ/м.



*Рис. 2 Внешний вид прибора ПЗ-50:  
 1 – устройство отсчетное УОЗ-50; 2 – антенна преобразователь ЕЗ-50;  
 3 – изоляционные ручки; 4 – соединительный кабель*

В зависимости от положения переключателей при измерении напряженности ЭП могут быть установлены пределы измерения, указанные в табл. 2.

Таблица 2

Предел измерения, кВ/м	Положение переключателя x0,1/x1/x10	Положение переключателя 2/20/200
200	x1	200
20	x1	20
2	x1	2
0,2	x0,1	2

Для определения среднеквадратического значения модуля вектора напряженности ЭП следует измерить в выбранной точке пространства проекции вектора напряженности поля на три взаимно ортогональные оси  $E_x$ ,  $E_y$  и  $E_z$ . После чего определить модуль вектора напряженности электрического поля  $E$  по формуле

$$E = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2 + (E_z)^2}. \quad (9)$$

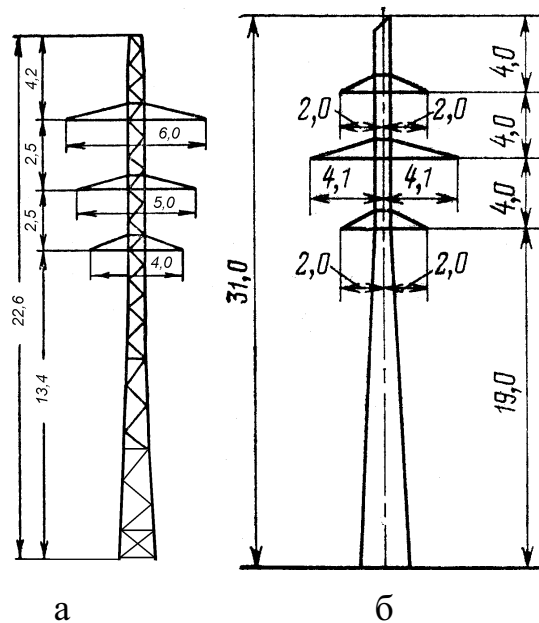


Рис. 3. Унифицированные стальные опоры для ВЛ 35 кВ -ПЛА 1/3 (а) и для ВЛ 110 кВ -П110-2 (б)

### Порядок работы

1. Ознакомиться перед началом работы с устройством измерителя напряженности поля ПЗ-50, порядком проведения измерений.

2. Измерить среднеквадратическое значение модуля вектора напряженности электрического поля. Для этого в выбранной точке пространства измеряются проекции вектора напряженности поля на три взаимно ортогональные оси X, Y, Z. Провести измерения в высоковольтной лаборатории на разном расстоянии от пульта управления. Измерения проводить на высоте 1,8 м от земли. Высоковольтную установку не включать. Результаты занести в табл. 3.

3. Включить высоковольтную установку, установить напряжение на электродной системе 40...50 кВ. Произвести измерения согласно п. 2.

4. Измерить напряженность электрического поля под ВЛ (35 или 110 кВ) на разных расстояниях X от проекции нижней фазы на открытой местности. Результаты занести в табл. 3.

5. Измерить напряженность электрического поля под ВЛ (35 или 110 кВ) на разных расстояниях X от проекции нижней фазы при наличии растительности под ВЛ. Результаты занести в табл. 4.

6. Произвести расчет напряженности электрического поля на разных расстояниях от X оси нижней фазы ВЛ на высоте 1,8 м от земли. Параметры для расчета:

ВЛ 35 кВ: Опора – ПЛА 1/3 (рис. 3, а), изоляция ЗПФ-6А, марка провода АС 70/11, стрела провеса  $f = 0,5$  м.

ВЛ 110 кВ: Опора – П110-2 (рис. 3, б), изоляция 7ПС-11, марка провода АС 95/16, стрела провеса  $f = 1$  м.

7. Построить поперечный профиль изменения напряженности электрического поля от расстояния до проекции нижней фазы  $E=f(x)$  по экспериментальным и расчетным данным табл. 4. Объяснить характер изменения напряженности поля. Сравнить измеренные уровни напряженности поля с допустимыми нормами.

8. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 3

Расстояние от пульты управления, м	$E_x$ , кВ/м	$E_y$ , кВ/м	$E_z$ , кВ/м	$E$ , кВ/м	Примечания
					Установка выключена
					Установка включена, U= кВ

Таблица 4

X, м	$E_x$ , кВ/м	$E_y$ , кВ/м	$E_z$ , кВ/м	$E_{эксп}$ , кВ/м	$E_1$ , кВ/м	$E_2$ , кВ/м	$E_{расч}$ , кВ/м	Примечания
								ВЛ кВ
								Растительный массив под ВЛ

### Контрольные вопросы

1. Что является причиной появления электрического поля от высоковольтных устройств?
2. Перечислите факторы, влияющие на величину напряженности электрического поля под линией высокого напряжения.
3. Какие мероприятия применяются для снижения напряженности электрического поля вблизи ВЛ?
4. Почему наличие растительности под ВЛ снижает напряженность электрического поля?

## **2. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ОТ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

Цель работы: изучить допустимые нормы напряженности магнитного поля промышленной частоты для персонала и населения, ознакомиться с применением измерителя напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50. Измерить напряженность магнитного поля вблизи кабельных линий, находящихся в здании.

### **Общие сведения**

Электроустановки электроэнергетических и промышленных предприятий, исследовательских лабораторий являются источником магнитного поля (МП) частотой 50 Гц. Магнитное поле – одна из составляющих электромагнитного поля, которая создается током, протекающим через проводник. Магнитное поле имеет место в электроустановках всех классов напряжения. Его интенсивность выше вблизи выводов генераторов, токопроводов, блочных силовых трансформаторов и автотрансформаторов связи ОРУ разных напряжений (особенно на уровне разъема бака), а также ЗРУ 6...10 кВ и вблизи них. В помещениях вблизи КРУ, у токопроводов, вблизи электродвигателей, ОРУ, КЛ, ВЛ всех напряжений интенсивность магнитного поля существенно ниже. Более сложная ситуация с системой кабельных линий здания. При появлении в кабельной линии тока утечки возникает дисбаланс, т.е. неравенство нулю суммарного тока по кабельной линии, что создает в окружающем пространстве магнитное поле, медленно убывающее с увеличением расстояния от рассматриваемого кабеля. Кроме того, наличие токов утечки в системе электроснабжения здания приводит к протеканию токов по металлоконструкциям и трубопроводным системам, что также является причиной увеличения уровней МП ПЧ.

Воздействие магнитного поля на персонал может быть как общим, так и преимущественно локальным (на конечности). Магнитное поле индуцирует в теле человека вихревые токи. Согласно современным представлениям, индуцирование вихревых токов является основным механизмом биологического действия магнитных полей. Его основной характеристикой является плотность вихревых токов. Допустимое значение плотности вихревого тока в организме положено в основу и всех действующих в мире гигиенических регламентов магнитного поля (с разными коэффициентами гигиенического запаса).

Интенсивность воздействия МП определяется эффективными значениями напряженности (Н) или магнитной индукции (В). Напряженность МП выражается в А/м (кратная величина кА/м); магнитная индукция в Тл (дольные величины мТл, мкТл, нТл). Индукция и напряженность МП связаны следующим соотношением:

$$B = \mu_0 \cdot H = 1,25 \cdot H, \text{ мкТл}, \quad (10)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$H$  – напряженность магнитного поля, А/м.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) магнитного поля устанавливаются в зависимости от времени пребывания персонала в условиях общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия (табл. 5).

Таблица 5

*Предельно допустимые уровни магнитного поля  
(СанПиН 2.2.4.1191–03)*

Время пребывания, ч	Допустимые уровни МП, Н [А/м]/В [мкТл] при воздействии	
	общем	локальном
< 1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

При необходимости пребывания персонала в зонах с различной напряженностью (индукцией) МП общее время выполнения работ в этих зонах не должно превышать предельно допустимое для зоны с максимальной напряженностью. Допустимое время пребывания может быть реализовано однократно или дробно в течение рабочего дня.

Контроль за соблюдением уровней электромагнитного поля частотой 50 Гц должен осуществляться на рабочих местах персонала, обслуживающего электроустановки переменного тока (линии электропередачи, распределительные устройства и др.), электросварочное оборудование, высоковольтное электрооборудование промышленного, научного и медицинского назначения и др.

Согласно докладу рабочей группы *CIGRE* для всех людей допускается неограниченное время воздействия МП напряженностью 80 А/м. В последние годы все чаще говорят о необходимости локального снижения допустимого уровня МП, например, около школ, игровых площадок и т.д.

В свою очередь, причиной повышенного уровня магнитного поля, как правило, являются недостатки в проектировании, монтаже и эксплуатации распределительных сетей в зданиях. Российская предельно-допустимая гигиеническая норма – 10 мкТл внутри жилых помещений и 50 мкТл на территории зоны жилой застройки (СанПиН 2.1.2.1002–00).

В 2001 году Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) в информационном сообщении «Electromagnetic fields and public health. Extremely low frequency fields and cancer» заявила, что в рамках современных научных представлений, магнитное поле промышленной частоты (МП ПЧ) со значениями плотности магнитного потока, превышающими 0,3...0,4 мкТл, в условиях продолжительного воздействия, возможно, является канцерогенным фактором окружающей среды. Поэтому ВОЗ рекомендует придерживаться предупредительного принципа, т.е. всеми доступными средствами ограничивать воздействие МП ПЧ на организм человека.

Биологическая эффективность МП зависит от интенсивности и продолжительности воздействия. Доказана возможность неблагоприятного влияния МП на здоровье человека. Реакции организма имеют неспецифический характер. Обследование взрослого населения показало, что существует еще одна проблема, лежащая в появлении отдельных последствий у лиц, имеющих контакт с МП ПЧ, и поднятая во многих публикациях. Она заключается в возможности развития нейродегенеративных болезней и неврологических расстройств. К этой возможной патологии в настоящее время относят депрессивный синдром, прогрессирующую мышечную атрофию (боковой амиотрофический склероз), болезни Альцгеймера и Паркинсона, а также возможное учащение случаев самоубийств.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рекомендует придерживаться безопасного уровня в 0,2 мкТл, учитывая относительную неизученность отдаленных последствий воздействия этого фактора.

Магнитные поля промышленной частоты биологически значимого уровня 0,2 мкТл и выше, продолжительного периода воздействия имеют широкое распространение в условиях непрофессионального воздействия. Они фиксируются на постоянных рабочих местах независимо от профессиональной категории работающих, а также внутри жилых помещений (табл. 6).

Таблица 6

*Уровни МП ПЧ бытовых электроприборов на расстоянии 0,3 м*

Бытовой электроприбор	От, мкТл	До, мкТл
Пылесос	0,2	2,2
Дрель	2,2	5,4
Миксер	0,5	2,2
Люминесцентная лампа	0,5	2,5
Микроволновая печь	4,0	12
Электрическая плита	0,4	4,5

**Меры защиты персонала и населения от воздействия магнитного поля**

Контроль за соблюдением уровней электромагнитного поля частотой 50 Гц должен осуществляться на рабочих местах персонала, обслуживающего электроустановки переменного тока (линии электропередачи, распределительные устройства и др.), электросварочное оборудование, высоковольтное электрооборудование промышленного, научного и медицинского назначения и др.

Измерения напряженности МП частотой 50 Гц должны проводиться на высоте 0,5; 1,5 и 1,8 м от поверхности земли, пола помещения или площадки обслуживания оборудования и на расстоянии 0,5 м от оборудования и конструкций, стен зданий и сооружений. При нахождении источника МП под рабочим местом измерения должны проводиться также на уровне пола помещения, земли. Определяющим является наибольшее зарегистрированное значение.

На рабочих местах, расположенных на уровне земли и вне зоны действия экранирующих устройств, в соответствии с государственным стандартом на экранирующие устройства для защиты от электрических полей промышленной частоты, напряженность ЭП частотой 50 Гц допускается измерять лишь на высоте 1,8 м.

Измерение напряженности (индукции) МП должно производиться на всех рабочих местах эксплуатационного персонала электроустановок, в местах прохода персонала (в т. ч. вблизи экранированных токопроводов, под шинными мостами и т. п.), а также в производственных помещениях с постоянным пребыванием персонала, расположенных на расстоянии менее 20 м от токоведущих частей электроустановок, в т. ч. отделенных от них стеной.

Напряженность (индукция) МП на рабочих местах должна измеряться при:

- приемке в эксплуатацию новых электроустановок;
- расширении действующих электроустановок;



- оборудовании помещений для постоянного или временного пребывания персонала, находящегося вблизи электроустановок (лаборатории, кабинеты АУЛ, мастерские, узлы связи и т. п.);
- аттестации рабочих мест.

Измерения и расчет напряженности (индукции) МП частотой 50 Гц должны производиться при максимальном рабочем токе электроустановки, либо измеренные значения должны пересчитываться на максимальный рабочий ток ( $I_{max}$ ) путем умножения измеренных значений на отношение  $I_{max}/I$ , где  $I$  – ток электроустановки при измерениях.

Обеспечение защиты работающих от неблагоприятного влияния МП осуществляется путем проведения организационных и технических мероприятий. К организационным относятся мероприятия, обеспечивающие соблюдение требований ограничения продолжительности пребывания персонала в условиях воздействия МП (без нарушения сложившейся системы эксплуатационного обслуживания электрооборудования) и организации рабочих мест на расстоянии от токоведущих частей оборудования, обеспечивающих соблюдение ПДУ.

При проектировании электроустановок организационные мероприятия включают:

- отказ от размещения производственных помещений, рассчитанных на постоянное пребывание персонала, вблизи токоведущих частей электроустановок, а также под и над токоведущими частями оборудования (например, токопроводами) за исключением случаев, когда уровни МП по результатам расчета не превышают предельно допустимые;
- расположение путей передвижения обслуживающего персонала на расстоянии от экранированных токопроводов и (или) шинных мостов, обеспечивающих соблюдение ПДУ;
- исключение расположения токоограничивающих реакторов и выключателей в соседних ячейках РУ 6...10 кВ;
- при проектировании ВЛ предпочтение должно отдаваться двухцепным ВЛ с расположением фазных проводов, обеспечивающих максимальную компенсацию МП фазных проводов обеих цепей;
- при проектировании КЛ их расположение должно обеспечивать соблюдение допустимых значений МП у поверхности земли.

При эксплуатации электроустановок организационные мероприятия включают следующее:

- зоны с уровнями МП, превышающими предельно допустимые, где по условиям эксплуатации не требуется даже кратковременное пребывание персонала (например, камеры выводов турбогенераторов), должны ограждаться и обозначаться соответствующими предупредительными знаками;

- осмотр электрооборудования, находящегося под напряжением, должен осуществляться из зон с уровнями МП, удовлетворяющими нормативным требованиям;
- ремонт электрооборудования следует производить вне зоны влияния МП.

К техническим мероприятиям относятся мероприятия, снижающие уровни МП на рабочих местах путем экранирования источников МП или рабочих мест. Экранирование должно осуществляться посредством материалов с высокой магнитной постоянной или активных экранов.

### Аппаратура для измерения

Измеритель напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50Б (рис. 4) предназначен для измерения среднеквадратичного значения напряженности магнитного поля промышленной частоты, возбуждаемого вблизи электроустановок высокого напряжения в диапазоне от 0,1 до 1800 А/м.



*Рис. 4. Внешний вид прибора ПЗ-50Б:*

*1 – устройство отсчетное УОЗ-50; 2 – антенна преобразователь НЗ-50;  
3 – изоляционная ручка; 4 – соединительный кабель*

Измеритель состоит из антенны-преобразователя (АП) НЗ-50 и устройства отсчетного УОЗ-50. АП типа НЗ-50 представляет собой экранированную рамочную антенну электрически малых размеров (средний диаметр рамки 80 мм, число витков 5600). При помещении АП в МП в обмотке антенны наводится переменное напряжение, пропорциональное проекции вектора напряженности поля на ось, перпендикулярную плоскости рамки. Переменное напряжение далее че-

рез кабель поступает на устройство отсчетное УОЗ-50, где происходит преобразование сигнала с АП в цифровой сигнал и индикация напряженности МП в абсолютных единицах А/м.

В зависимости от положения переключателей при измерении напряженности МП могут быть установлены пределы измерения, указанные в табл. 7.

Таблица 7

Предел измерения, А/м	Положение переключателя x0,1/x1/x10	Положение переключателя 2/20/200
2000	x10	200
200	x1	200
20	x1	20
2	x1	2
0,2	x0,1	2

Для определения среднеквадратического значения модуля вектора напряженности МП следует измерить в выбранной точке пространства проекции вектора напряженности поля на три взаимно ортогональные оси  $H_x$ ,  $H_y$  и  $H_z$ . Затем определить модуль вектора напряженности электрического поля  $H$  по формуле

$$H = \sqrt{(H_x)^2 + (H_y)^2 + (H_z)^2}. \quad (11)$$

### Порядок работы

1. Ознакомиться перед началом работы с устройством измерителя напряженности поля ПЗ-50Б, порядком проведения измерений.
2. Провести измерения напряженности магнитного поля в высоковольтной лаборатории на разном расстоянии от пульта управления. Измерения проводить на высоте 1,8 м от земли. Результаты занести в табл. 8.
3. Измерить среднеквадратическое значение модуля вектора напряженности магнитного поля. Для этого в выбранной точке пространства измеряются проекции вектора напряженности поля на три взаимно ортогональные оси X, Y, Z.
4. По результатам измерения составить карту распределения магнитных полей вблизи кабельных линий. Сравнить измеренные уровни напряженности магнитного поля с допустимыми нормами.
5. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 8

Расстояние от кабельных линий, м	$H_x$ , А/м	$H_y$ , А/м	$H_z$ , А/м	$H$ , А/м	Примечания

### Контрольные вопросы

1. Что является причиной появления магнитного поля от высоковольтных устройств?
2. Перечислите факторы, влияющие на величину напряженности магнитного поля от высоковольтных установок.
3. Какие мероприятия применяются для снижения напряженности магнитного поля на подстанциях?

## 3. ИЗУЧЕНИЕ КАНАЛОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Цель работы: ознакомиться с каналами распространения электромагнитных помех и способами их ограничения, измерить помехи в контурах при гальванической, емкостной и индуктивной связях.

### Краткие сведения

Знание путей передачи помех является решающим в обеспечении электромагнитной совместимости устройств, так как дает возможность изолировать источники помех, повышать устойчивость устройства к внешним воздействиям и подавлять помехи на пути от их источника к приемнику. Существенным является значение механизмов связи  $K$  между источником помех  $Q$  и чувствительным к помехам элементом прибора  $S$ , обусловленных этими механизмами воздействий и соответствующих основных правил, по которым можно эффективно противостоять этим воздействиям уже на стадии проектирования, создания устройств. Между передатчиком помехи и приемником энергия может переноситься посредством гальванической связи, через поле, или излучением (рис. 5).

Идентификация механизмов связи, включённых между источником и приёмником помех, является непростой задачей, так как часто речь идёт о не предусмотренных конструктором путях передачи, например, через паразитные ёмкости, индуктивности рассеяния, которые часто

проявляются лишь в виде вызванных ими электромагнитных влияний. Блоки не должны быть соединены непосредственно для того, чтобы существовала связь между ними. Когда по проводнику протекает ток, вокруг него возникает магнитное поле; когда между проводниками появляется напряжение, между ними возникает электрическое поле. Каждое из этих полевых явлений способно к индукции мешающего сигнала во вторичной цепи, охваченной полем. Эти принципиальные положения используются в трансформаторах и конденсаторах. Полевые задачи ЭМС, относящиеся к связи в ближней зоне, есть не что иное, как управление нежелательными трансформаторами и конденсаторами в конструкции. Их называют «распределенными» или паразитными. На высоких частотах они становятся весьма значительными.

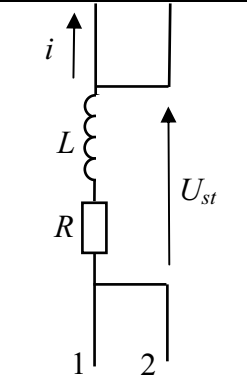
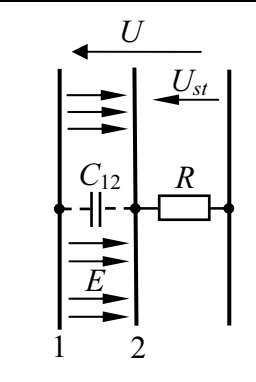
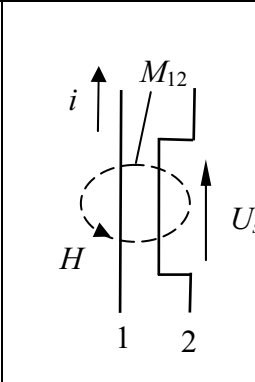
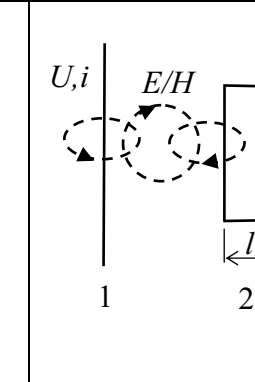
Влияние по проводам	Влияние через поле		
	Емкостная связь (E-поле)	Индуктивная связь (H-поле)	Электромагнитная связь (E/H-поле)
			
$U_{st} = iR + L \frac{di}{dt}$	$U_{st} = RC_{12} \frac{du}{dt}$	$U_{st} = M_{12} \frac{di}{dt}$	$U_{st} \approx E \cdot l_{eff}$
	ближнее поле $x < \lambda/2\pi$		дальнее поле $x > \lambda/2\pi$

Рис. 5. Механизмы электромагнитных связей источников (1) и приемников (2) помех

На практике в большинстве случаев одновременно по нескольким каналам связи действуют несколько видов помех, что существенно затрудняет их достоверное описание.

**Гальваническая связь.** Гальваническая или металлическая связь появляется тогда, когда два электрических контура имеют общее сопротивление  $Z$  (рис. 5, а). Влияние осуществляется через внутренние сопро-

тивления сетевых проводов, систем опорного потенциала или через систему защитных и заземляющих проводов.

Для снижения помех через гальваническую связь в соединительных проводах сетей питания и сигнальных контурах рекомендуются следующие мероприятия:

- 1) выполнение соединения между двумя и более контурами с возможно низким полным сопротивлением, особенно низкой индуктивностью. Для этого используются проводники с большим сечением или плоские шины;
- 2) гальваническая развязка, т.е. устранение совместных проводящих соединений между различными контурами или гальваническое разъединение контуров таким образом, чтобы ток наиболее мощного контура не протекал по слаботочному контуру;
- 3) выбор скорости изменения тока не большей, чем требуется по условиям функционирования;
- 4) использование разделительных трансформаторов (рис. 6, а). Применяем для сигналов с низкой и средней частотой. При высокой частоте происходит преобразование синфазных помех в противофазные из-за паразитной емкости  $C$ ;
- 5) нейтрализующий трансформатор. Обмотки  $W1$  и  $W2$  намотаны согласно, потоки от полезного сигнала компенсируются (рис. 6, б), от токов помех суммируются. Действие лучше, чем выше частота помехи;
- 6) ферритовые кольца (рис. 6, в). Повышенное сопротивление току помех, особенно эффективны при частоте выше 1 МГц;
- 7) линия с повышенным затуханием (рис. 6, г). Действие такое же, как и ферритовых колец.

Для снижения помех через гальваническое влияние по контурам заземления рекомендуются:

- 1) уменьшение сопротивления между точками заземления цепей за счет конструирования пола в виде эквипотенциальной поверхности или их соединения массивными проводниками (рис. 7);
- 2) разделение контуров заземления. Эффективная защита возможна только при постоянном напряжении и низких частотах.

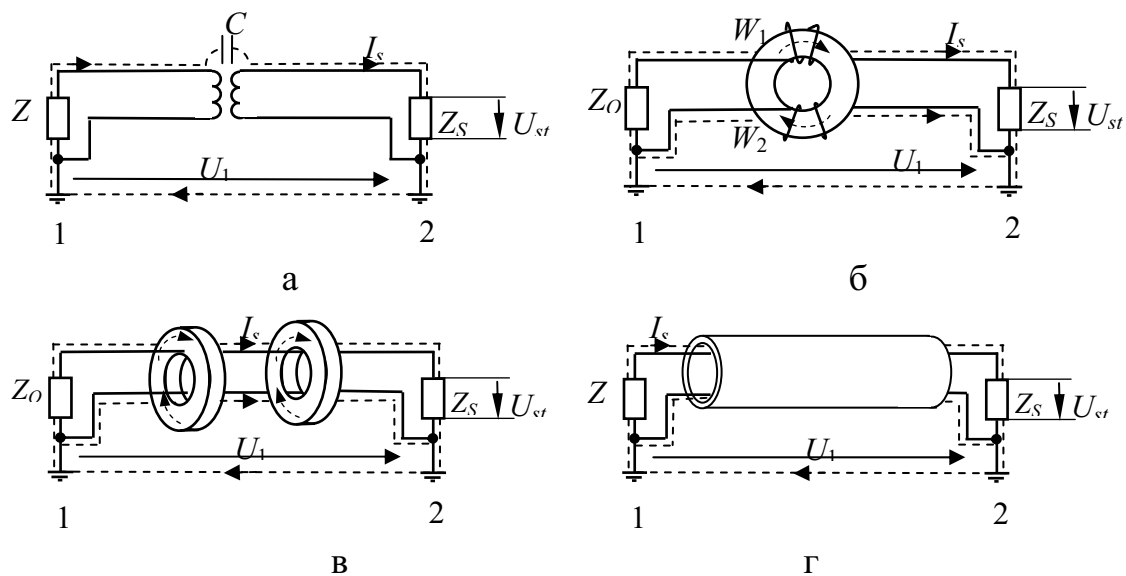


Рис. 6. Мероприятия по снижению гальванического влияния в петлях заземления. 1, 2 – точки заземления,  $Z_0$ ,  $Z_S$  – сопротивления источника и приемника,  $I_{st}$  – ток помехи,  $U_{12}$  – напряжение помехи

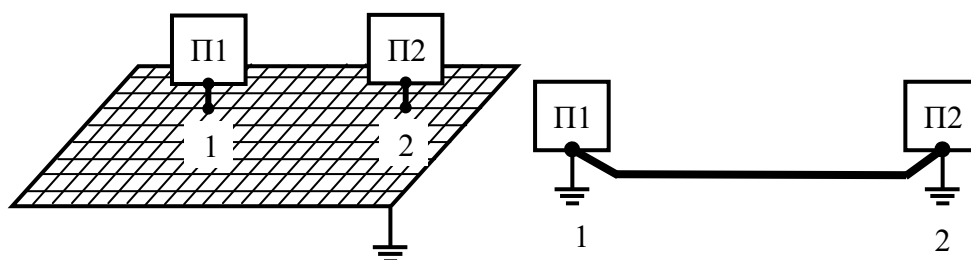


Рис. 7. Примеры выполнения контуров заземления

**Емкостная связь.** Емкостная связь возникает через паразитные емкости между двумя контурами, проводники которых находятся под разными потенциалами (рис. 5, б) или между протяженными линиями и землей (рис. 8). Данный вид связи действует на небольшом расстоянии.

Мероприятия по снижению помех через емкостную связь:

1) гальванически разделенные контуры:

- попарное скручиванием проводников каждого контура;
- применение экранированных проводов;

2) токовые контуры с большой емкостью относительно земли:

- выполнение сигнального контура предельно низкоомным;
- экранирование сигнальной линии (рис. 9, а);
- симметричное выполнение линии относительно земли; при полной симметрии  $U = 0$ , (рис. 9, б);

- введение на приемном конце разделяющих элементов (рис. 9, в);
- проникновение помехи определяется паразитной емкостью;
- применение для передачи сигналов световодов. Практически полностью устраняет влияние паразитной емкости; (рис. 9, г).

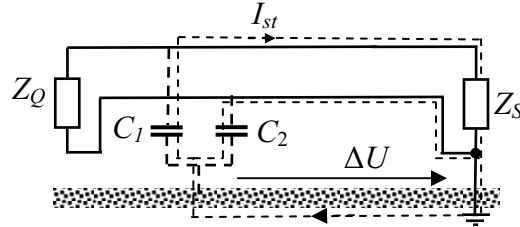


Рис. 8. Емкостная связь между протяженной линией и землей

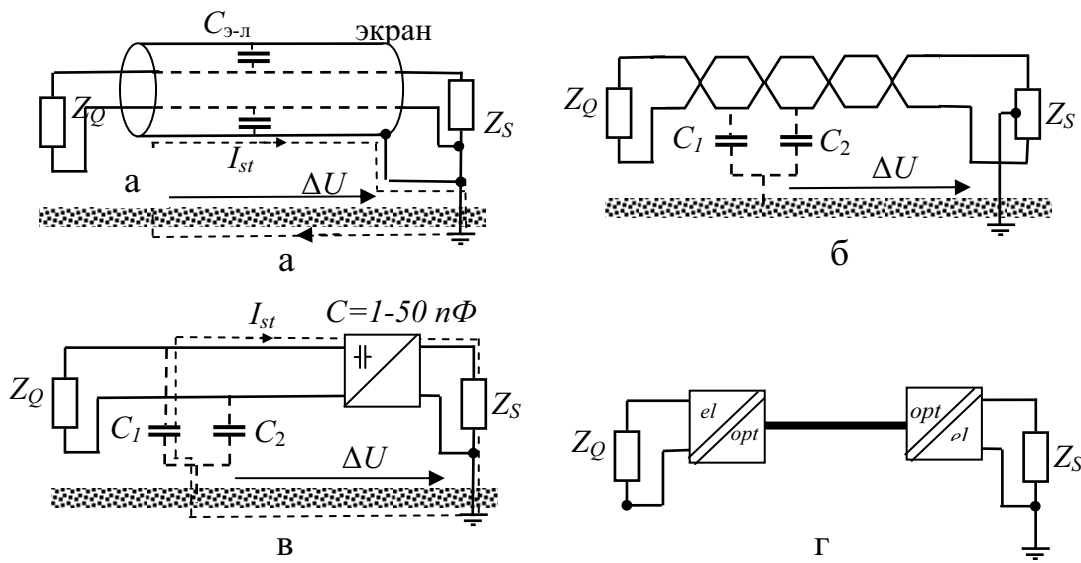


Рис. 9. Мероприятия для снижения помех через емкостную связь

**Индуктивная связь.** Индуктивная или магнитная связь возникает между двумя или несколькими контурами с токами (рис. 5, в). Ток  $I$  вызывает переменное магнитное поле, которое индуцирует в контуре 2, напряжение помехи. Воздействие магнитного поля контура 1 на контур 2 в эквивалентной схеме соответствует взаимной индуктивности  $M$  или индуцируемой ЭДС.

В качестве примера на рис. 10, а показаны два индуктивно связанных контура. Если в контуре 1 имеет место быстрое изменение тока  $\Delta i/\Delta t$ , например, при коммутациях, то в контуре 2 индуцируется напряжение помехи

$$U_{st} = M \cdot \Delta i / \Delta t = -\Delta \Phi / \Delta t, \quad (12)$$



где  $\Phi$  – магнитный поток, пронизывающий контур 2;  $M$  – взаимная индуктивность контуров 1 и 2.

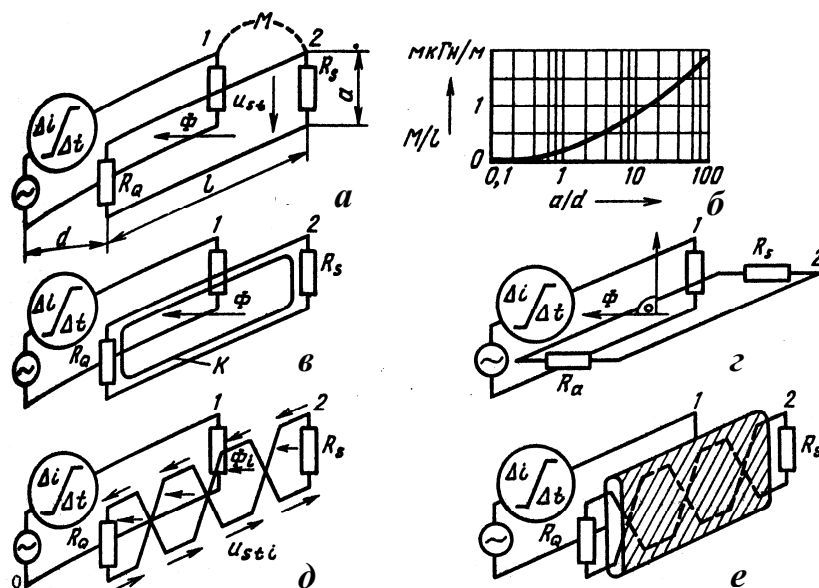


Рис. 10. Индуктивная связь между промышленными токовыми контурами:  
 а – принципиальная схема двух токовых контуров 1 и 2 с расстоянием  $d$  между ними; б – погонная взаимная индуктивность  $M/l$  в зависимости от  $a/d$ ; в–е – меры по снижению влияния (пояснения см. в тексте)

Кроме этого, индуктивная связь обусловлена паразитным потокосцеплением между контурами промышленных устройств, возникающим при ударах молнии или разрядах статического электричества соответственно.

Мероприятия по снижению индуктированных напряжений предусматривают:

- снижение до возможных пределов взаимной индуктивности  $M$ , т. е. уменьшение за счет сокращения длины проводников, увеличение расстояния между сетевыми и информационными проводами, уменьшение площади контура, подвергающегося воздействию;
- уменьшение скорости изменения во времени потока  $\Delta\Phi/\Delta t$  при помощи короткозамкнутой петли  $K$ , расположенной непосредственно у сигнального контура (рис. 10, в);
- осуществление связи контуров 1 и 2 ортогонально направлению силовым линиям магнитного поля (рис. 10, г). Этот способ эффективен в устройствах, выполненных в виде катушек;
- компенсация индуктированного в контуре 2 напряжения путем скручивания проводов (рис. 10, д). При этом частичные потоки  $\Phi_i$  создают напряжения, направленные противоположно;

- снижение действия созданного магнитного потока скручиванием соединительных проводов контура 1. При этом подаются встречно направленные компоненты потока, а их действие на вторичный контур компенсируется;
- экранирование кабелей, соединительных проводов (рис. 10, е), модулей и приборов ферромагнитными экранами (трубами, металлическими шлангами, стальными корпусами), причем экранирующее воздействие повышается с увеличением магнитной проницаемости материала и толщины стенки экрана. Проводящие соединения между экраном и землей необязательны, однако они необходимы для защиты от напряжения прикосновения. Для ослабления воздействий, вызванных молнией, применяется ферромагнитное экранирование кабелей передачи данных, проложенных по воздуху, экраны которых заземляются на обоих концах.

**Связь через электромагнитное излучение.** Любое изменение электрического поля между проводниками вызовет ток, приводящий к изменению напряжения, а любое изменение тока вызывает изменение разности потенциалов (рис. 5, г). Таким образом, поля на переменном токе по существу являются композицией как электрической, так и магнитной компоненты, и при повышении частоты становится все труднее и менее необходимо трактовать их отдельно.

На достаточном расстоянии от структуры, несущей излучающие токи и напряжения, магнитная и электрическая компоненты формируются в распространяющуюся электромагнитную волну. Два компонентных вектора расположены под прямым углом друг к другу и к направлению распространения и лежат в плоскости, которая может быть наглядно представлена как распространяющаяся от излучателя во все направления, и связаны через волновое сопротивление вакуума (рис. 11):

$$\frac{E}{H} = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \text{ Ом}; \quad (13)$$

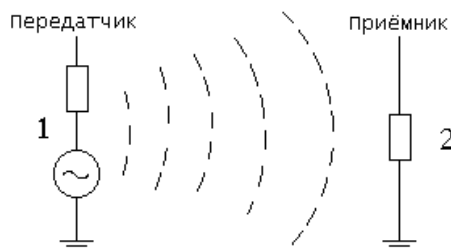


Рис. 11. Связь через излучение

Связь посредством излучения зависит от параметров источника и рецептора как антенн. Конструкция электронных устройств (не радио) не проектируются специально в виде антенн, но в некоторых случаях они могут достаточно эффективно преобразовывать электромагнитную энергию на некоторых частотах, что приводит к появлению помех. Для уменьшения помех применяется экранирование.

### Аппаратура для измерений

Источником синусоидального сигнала является генератор ГЗ-123. Он генерирует синусоидальное напряжение амплитудой до 200 В и частотой от 1 Гц до 0,3 МГц. Регистрация импульсов осуществляется цифровым осциллографом PSC500А, совмещенным с компьютером.

### Порядок работы

1. Собрать схему для двух контуров с гальванической связью. Измерить величину помехи  $U_{st}$  при разных частотах сигнала  $f$ .
2. Изменить параметры контура (увеличить длину общего проводника или использовать проводники другого сечения) и повторить измерения.
3. Рассчитать  $R$  и  $L$  общих проводников, использованных при измерениях.
4. Собрать схему для двух контуров с емкостной связью. При неизменном расстоянии между контурами  $S$  измерить величину помехи  $U_{st}$  при разных частотах сигнала  $f$ .
5. Измерить величину помехи  $U_{st}$  при разных частотах сигнала  $f$  для контуров при неизменном расстоянии  $S$ .
6. Измерить величину помехи  $U_{st}$  для разных расстояний между контурами  $S$  при неизменной частоте сигнала  $f$ .
7. Собрать схему для двух контуров с индуктивной связью. Для контура при неизменном расстоянии  $S$  измерить величину помехи  $U_{st}$  при разных частотах сигнала  $f$ .
8. Измерить величину помехи  $U_{st}$  для разных расстояний между контурами  $S$  при неизменной частоте сигнала  $f$ .
9. Установить контуры ортогонально и произвести измерения по п. 6,7.
10. Установить между контурами экран и убедиться в его эффективности.
11. Построить зависимости  $U_{st}(lgf)$  при  $S = const$  и  $U_{st}(S)$  при  $f = const$  для всех видов связей. Объяснить полученные графики.
12. Ответить на контрольные вопросы.

## **Контрольные вопросы**

1. Перечислите механизмы связи, по которым передаются помехи.
2. Перечислите причины возникновения помех через гальваническую связь.
3. Перечислите причины возникновения помех через емкостную связь.
4. Перечислите причины возникновения помех через индуктивную связь.

## **4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ СЕТЕВОГО ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩЕГО ФИЛЬТРА**

Цель работы: изучить принцип действия и конструкцию помехоподавляющих фильтров, определить коэффициент затухания для различных схем простейших помехоподавляющих фильтров.

### **Краткие сведения**

Целью фильтрации в контексте ЭМС является предотвращение проникновения помех в аппаратуру или их утечки от аппаратуры по сигнальным цепям или цепям питания. Это непосредственно уменьшает уровень гальванической связи и способствует уменьшению связи посредством излучения от кабелей, снижает их восприимчивость к излучаемым помехам и позволяет ограничить опасные для изоляции и функционирования приборов напряжения помех.

Помехоподавляющие фильтры представляют собой элементы для обеспечения затухания поступающей по проводам помехи. Целесообразное их применение предполагает, что частоты полезного сигнала и помехи достаточно отличаются друг от друга. Это позволяет при соответствующих параметрах фильтра обеспечить выборочное ослабление помехи при отсутствии заметного искажения полезного сигнала.

Качество фильтра оценивают, прежде всего, по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) или ее основным элементам: частоте и крутизне среза, коэффициенту пропускания в полосе прозрачности. По виду АЧХ различают полосовые (ПФ), режекторные фильтры (РФ), фильтры нижних (ФНЧ) и верхних (ФВЧ) частот (рис. 12).

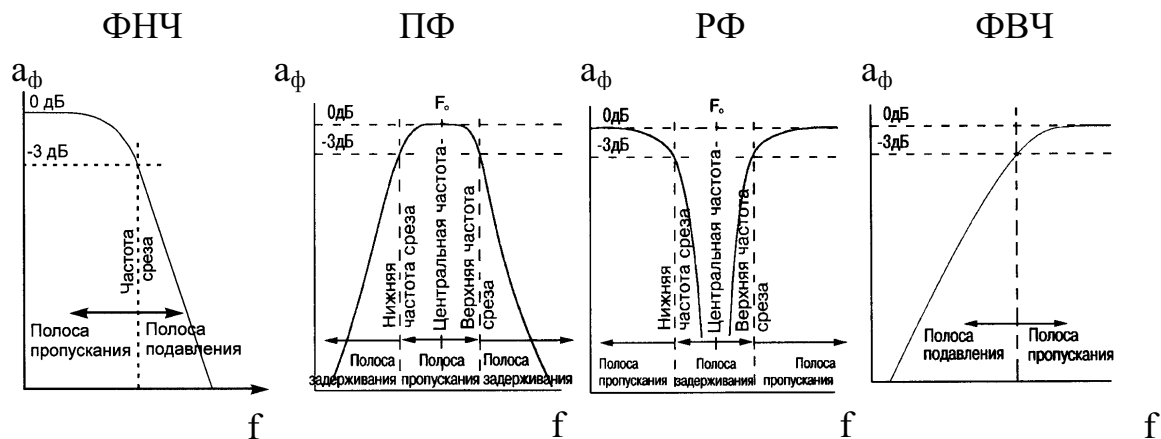


Рис. 12. Амплитудно-частотные характеристики фильтров

Частота среза  $f_{cp}$  определяется на некотором уровне, например, 0,9 от максимального значения коэффициента пропускания. Крутизну среза определяют в децибелах при двойном отклонении от частоты среза ( $0,5 f_{cp}$  для ФВЧ и  $2 f_{cp}$  для ФНЧ), которое называют октавой. Например, ФНЧ, имеющий  $f_{cp} = 1000$  Гц и крутизну среза  $\alpha_{\phi} = 20$  дБ/октава на частоте 500 Гц имеет коэффициент пропускания, в 10 раз меньше, чем на частоте 2000 Гц. Для полосовых фильтров задают верхнюю и нижнюю частоты среза, для режекторных – центральную частоту  $f_0$ .

Все фильтры по исполнению делятся на две большие группы: пассивные и активные. Пассивные собираются из пассивных элементов: резисторов, конденсаторов и дросселей (катушек индуктивности). В активных фильтрах наряду с упомянутыми элементами используются также полупроводниковые приборы, микросхемы и схемы их питания. Активные фильтры в свою очередь делятся на аналоговые и цифровые. Достоинством активных фильтров по сравнению с пассивными является большая крутизна среза и больший коэффициент пропускания в полосе прозрачности, высокое входное и низкое выходное сопротивление.

Достижимый эффект затухания можно характеризовать коэффициентом затухания – логарифмом отношения напряжений на выходе  $U_{\phi}$  и входе  $U_0$  фильтра. Коэффициент затухания приводится, как правило, в виде логарифма отношения падения напряжений и выражается в децибелах:

$$a_{\phi} = 20 \lg \left| \frac{U_{\phi}}{U_0} \right|. \quad (14)$$

В понятиях ЭМС «фильтрация» всегда подразумевает низкочастотный фильтр, свободно пропускающий напряжение сети (полезный сигнал) и фильтрующий содержащиеся в сети высокочастотные составляющие (гармонические и образующие спектр импульсных помех). Их при-

менение преследует две цели: во-первых, защиту устройства от помех, поступающей из сети питания, и, во-вторых, снижение уровня эмиссии возможной помехи, исходящей от прибора по проводам питания.

Обычный ФНЧ построен на двух элементах: последовательной индуктивности или сопротивлении и параллельно подключенном конденсаторе. При минимальной конфигурации фильтр содержит только один из указанных компонентов, а их комбинация сформировать « $LC$ »-фильтр, « $T$ »-фильтр или фильтр « $\pi$ » (табл. 9). Выбор индуктивности или сопротивления обычно определяется значением тока полезного сигнала, который проходит через него: для фильтров источников питания типичное значение сопротивления не превышает нескольких Ом. Преимуществом сопротивлений является их способность поглощать энергию помех и препятствовать возникновению резонансов, и, конечно, меньшая стоимость и размеры по сравнению с индуктивностью. Индуктивность, с другой стороны, может обеспечить значительный уровень полного сопротивления на высоких частотах с малыми потерями на постоянном токе низких частотах. Индуктивность обладает высоким полным сопротивлением для помех и наиболее эффективна в цепях с низким полным сопротивлением. Конденсаторы создают низкое полное сопротивление, обеспечивающее ослабление на частотах помех, в связи с этим они наиболее эффективны в цепях с высоким полным сопротивлением. В общем случае любой компонент позволяет достичь максимального ослабления в 40...50 дБ из-за ограничений, вносимых его паразитными параметрами, поэтому фильтры с высокими показателями строятся по многозвенной схеме.

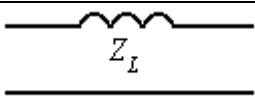
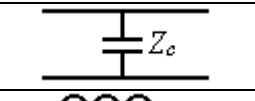
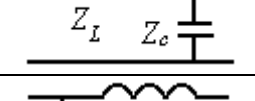
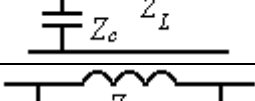
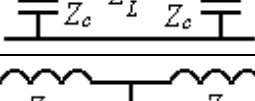
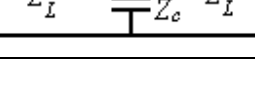
Исходя из требований ослабления помех и сопротивлений источника и нагрузки, между которыми должен быть фильтр, производится выбор его электрической схемы. Если значения  $\bar{Z}_O$  и  $\bar{Z}_S$  известны приблизительно, выбор подходящей фильтровой структуры может производиться с использованием данных табл. 9. При этом используется следующее правило: фильтр должен быть установлен так, чтобы конденсатор был обращен к высокому сопротивлению цепи, а индуктивность – к низкому. Это связано с тем, что для получения оптимальных характеристик помехоподавления структура фильтра должна обеспечивать достижение максимального рассогласования на входе и выходе фильтра. Поэтому при большом сопротивлении источника, первым элементом располагается конденсатор. В этом случае, когда частота помехи возрастает, реактивная составляющая  $C_x$  уменьшается, и в цепи происходит необходимое рассогласование, при котором помеха шунтируется на землю.

При малом сопротивлении источника, первым элементом должна быть индуктивность. С ростом частоты реактивная составляющая  $L_x$  увеличивается, обеспечивается рассогласование между индуктивностью и малым сопротивлением источника. Создаются условия поглощения или отражения сигнала помехи. Аналогично происходит при выборе последнего элемента фильтра.

Однако если существует вероятность выбросов тока, перенапряжений и других нестационарных процессов в аппаратуре, то на входе фильтра рекомендуется ставить индуктивность для того, чтобы ослабить перечисленные выше процессы, обеспечивая тем самым определенную степень защиты конденсатора.

Таблица 9

*Основные типы фильтров нижних частот и оценки вносимого затухания*

№	Сопротивление источника $Z_q$	Схема фильтра	Сопротивление приемника $Z_s$	Вносимое затухание
1	Мало		Мало	20 дБ/декада
2	Велико		Велико	20 дБ/декада
3	Мало		Велико	40 дБ/декада
4	Велико		Мало	40 дБ/декада
5	Велико, неизвестно		Велико, неизвестно	60 дБ/декада
6	Мало, неизвестно		Мало, неизвестно	60 дБ/декада

Рассмотрим каждый из приведенных в таблице типов фильтров.

Фильтр типа «С» (табл. 4.1, строка 1) представляет собой проходной конденсатор, шунтирующий помеху на землю. В основном используется для ослабления паразитных высокочастотных колебаний в линиях питания постоянного тока. Рекомендуется не использовать такой фильтр в цепях, где возможны броски напряжения или нестационарные процессы, так как это может разрушить конденсатор.

Фильтр типа «LC» (табл. 9, строка 3, 4) Состоит из одного индуктивного и одного емкостного элемента. Такой тип фильтра применяется

в тех случаях, когда полные сопротивления источника и нагрузки значительно отличаются друг от друга. Возможны два варианта их подключения: в первом случае, когда имеется низкое сопротивление источника и высокое сопротивление нагрузки, то подключение необходимо производить, как показано в табл. 9, строка 3. Если имеется высокое сопротивление источника и низкое сопротивление нагрузки, то подключение необходимо производить, как показано в табл. 9, строка 4. В силу простоты конструкции, такие фильтры являются более экономичными, чем обусловлено их широкое распространение.

Фильтр типа «л» (табл. 9, строка 5) состоит из двух емкостных и одного индуктивного элемента. Используется при высоких сопротивлениях источника и нагрузки.

Фильтр типа «Г» (табл. 9, строка 6) состоит из двух индуктивных элементов и одного емкостного. Широко применяется в цепях, которые могут быть подвержены нестационарным процессам. Также используется в цепях с низким сопротивлением источника и нагрузки, например, в источниках электропитания.

Компоненты фильтра, так же как и все другие, не идеальны. При использовании катушек индуктивности и конденсаторов для фильтрации следует иметь в виду, что любой конденсатор с емкостью  $C$  обладает паразитной индуктивностью  $L_n$ , зависящей от длины выводов конденсатора. Она особенно велика у двухполюсных конденсаторов и мала у коаксиальных конденсаторов-выводов. Каждая катушка индуктивности в дополнение к ее индуктивности  $L$  имеет паразитную емкость  $C_n$ .

Рис. 13 дает представление о затухании  $LC$ -фильтра с реальными элементами (рис. 13, а); в зависимости от диапазона частот коэффициент затухания определяется параметрами фильтра  $L$ ,  $C$  или паразитными параметрами  $L_n$ ,  $C_n$ . При низких частотах, когда элементы фильтра можно считать идеальными, коэффициент затухания  $a_\phi$  увеличивается пропорционально квадрату частоты. Затем начинает сказываться влияние параметров  $L_n$  и  $C_n$ , и  $a_\phi$  остается приблизительно неизменным. При высоких частотах эффект демпфирования в основном определяется паразитными параметрами  $L_n$ ,  $C_n$ , а коэффициент  $a_\phi$  уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты.

*Помехоподавляющие конденсаторы.* Полное сопротивление конденсатора в широком диапазоне частот определяется не только его емкостью, но и индуктивностью его выводных проводников. Эквивалентная схема конденсатора может быть представлена в виде последовательного контура  $L$ - $R$ - $C$ -контура. Таким образом, каждый конденсатор имеет определенную резонансную частоту, выше которой его полное сопротивление определяется уже не емкостью, а его собственной ин-



дуктивностью. Для расширения диапазона частот, в котором полное сопротивление конденсатора не превышало бы определенной величины, необходимо уменьшить собственную индуктивность конденсатора. Кроме того, к конденсаторам, в зависимости от условий их работы, предъявляются требования в отношении влагостойкости, теплостойкости, электрической и механической прочности и т. д. Для фильтрации радиочастот обычно применяются керамические конденсаторы, часто используются субминиатюрные полиэфировые или полистирольные конденсаторы.

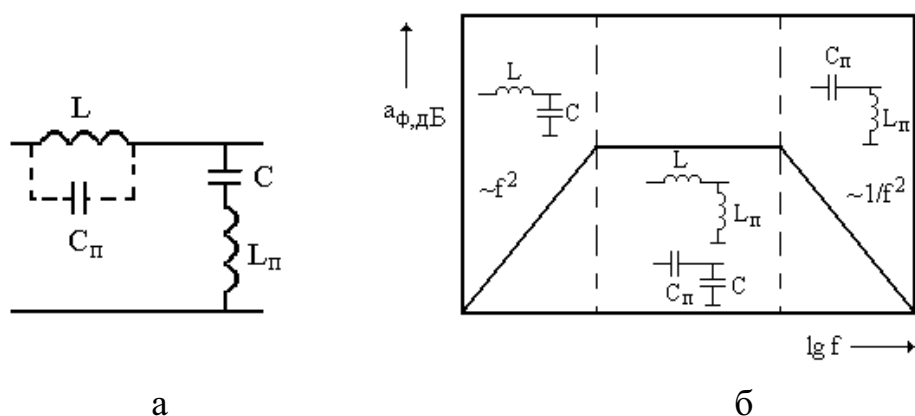


Рис. 13. Коэффициент затухания  $a_\phi$  фильтра LC:

а – схема замещения фильтра;

б – принципиальная частотная зависимость коэффициента затухания  $a_\phi$

Промышленностью выпускаются специальные помехоподавляющие конденсаторы типа КЗ. Эти конденсаторы имеют собственную индуктивность меньше  $50 \cdot 10^{-9}$  Гн. В ряде случаев ввиду недостаточно широкой номенклатуры конденсаторов типа КЗ, ограничений по весу и габаритам приходится применять обычные конденсаторы. Из них для фильтрации помехонесущих сетей рекомендуется применение конденсаторов типа КСО и КБГ и др. Но эти конденсаторы применяются на частотах до 10...20 МГц. Если частоты выше, то применяют проходные конденсаторы, например типа КБП.

**Помехоподавляющие дроссели.** Индуктивности выполняются в виде обмотки из провода. Чем физически больше этот элемент, тем больше его индуктивность, но также выше и собственная емкость. Число витков может быть уменьшено при использовании сердечника с высокой магнитной проницаемостью, но это также сопровождается включением высокой диэлектрической проницаемости, которая будет способствовать увеличению емкости. Для достижения минимальной собственной емко-

сти начало и конец обмотки должны быть по возможности разделены; одним из путей достижения этого является применение многосекционной обмотки. Однослойная обмотка обеспечивает меньшую собственную индуктивность. Если необходимо использовать большое число витков, чем возможно разместить в одном слое, то предпочтительнее применить прогрессивную намотку, чем послойную (рис. 14); это приведет к минимизации емкости.

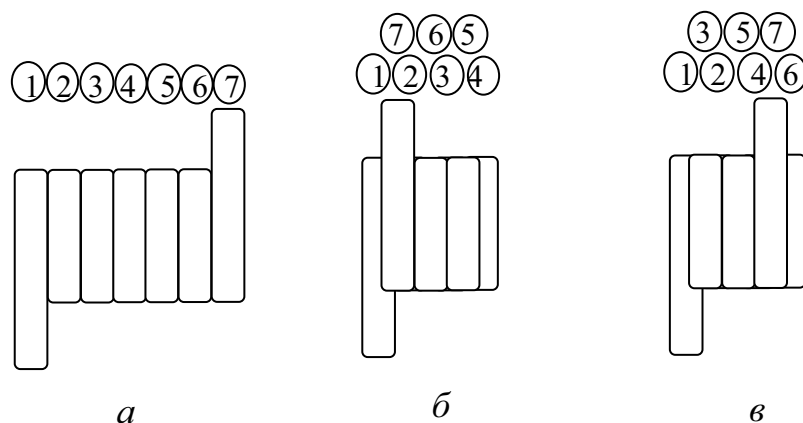


Рис. 14. Техника намотки индуктивностей:  
*а* – однослойная намотка; *б* – послойная намотка; *в* – прогрессивная намотка

### Расположение компонентов и монтаж фильтра

Индуктивность выводов и паразитные емкости приводят к ухудшению заданных параметров фильтров на высоких частотах. По двум основным причинам при применении фильтров не может обеспечить низкоиндуктивное заземление и соединения выводов входа и выхода, расположенных близко один от другого.

Плохое заземление обуславливает общее полное сопротивление, которое уменьшается с частотой, а связь на высоких частотах усиливается из-за локального пути заземления через фильтр. Общий монтаж входа/выхода способствует этому посредством паразитной емкости или взаимной индуктивности; это также возможно при «чистом» монтаже за счет связи со стороной, где сигнал не фильтрован, через непредусмотренные пути. Выходом из положения является монтаж фильтра таким образом, чтобы его точка заземления непосредственно соединялась с низкоимпедансной землей аппаратуры, а контакты ввода/вывода были разнесены и по возможности экранированы друг от друга. Наилучшим решением является расположение фильтра непосредственно на экране аппаратуры

(рис. 15). Ни в коем случае не допускается соединение вместе оплеток входных и выходных кабелей, подходящих к фильтру.

Расположение элементов внутри фильтра также играет существенную роль. Компоненты входа и выхода должны быть разнесены друг от друга для минимальной емкостной связи, все проводники сигнальные и проводники заземления особенно должны быть по возможности короче и массивнее. Лучшим решением является компоновка элементов фильтра в последовательности, обозначенной на принципиальной схеме. Если применяются индуктивные компоненты, то они должны быть спроектированы и расположены таким образом, чтобы магнитная связь между ними (через поля рассеяния) была минимальна; наилучшим решением является использование тороидальных сердечников.

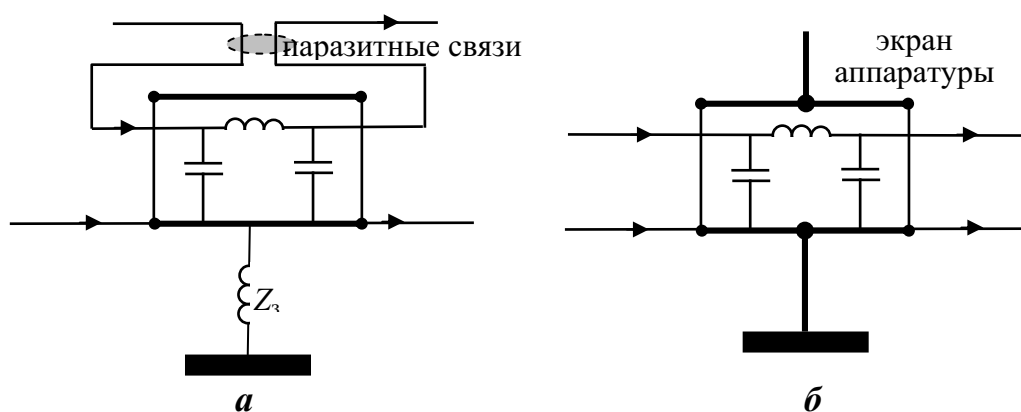


Рис. 15. Плохая (а) и хорошая (б) компоновка фильтра:  
 $Z_3$  – полное сопротивление контура заземления

Выбор параметров конденсаторов и дросселей, применяемых в качестве элементов фильтра, производится на основании расчета фильтра. В общем случае, фильтр любой структуры представляет собой четырехполюсник, объединяющий источник помехи и приемник.

Коэффициент затухания в фильтре любой структуры можно выразить как

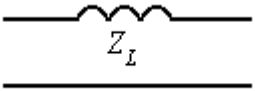
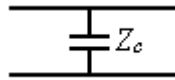
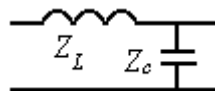
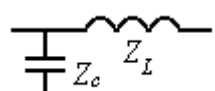
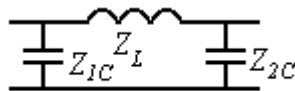
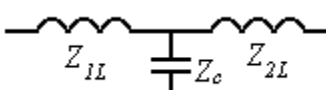
$$a_\phi = -20 \lg \left| \frac{\bar{Z}_s}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_o} \bar{A}_{11} + \frac{1}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_o} \bar{A}_{12} + \frac{\bar{Z}_s \bar{Z}_o}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_o} \bar{A}_{21} + \frac{\bar{Z}_o}{\bar{Z}_s + \bar{Z}_o} \bar{A}_{22} \right|, \quad (15)$$

где  $\bar{A}_{11}, \bar{A}_{12}, \bar{A}_{21}, \bar{A}_{22}$  комплексные параметры четырехполюсника.

Для расчета простейших фильтровых структур их конкретные значения представлены в табл. 10.

Таблица 10

Параметры четырехполюсников простейших схем фильтров

Схема	Коэффициент			
	$\bar{A}_{11}$	$\bar{A}_{12}$	$\bar{A}_{21}$	$\bar{A}_{22}$
	1	$\bar{Z}_L$	0	1
	1	0	$\frac{1}{\bar{Z}_c}$	1
	$1 + \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_c}$	$\bar{Z}_L$	$\frac{1}{\bar{Z}_c}$	1
	1	$\bar{Z}_L$	$\frac{1}{\bar{Z}_c}$	$1 + \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_c}$
	$1 + \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_{2C}}$	$\bar{Z}_L$	$\frac{1}{\bar{Z}_{1C}} + \frac{1}{\bar{Z}_{2C}} + \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_{1C}\bar{Z}_{2C}}$	$1 + \frac{\bar{Z}_L}{\bar{Z}_{1C}}$
	$1 + \frac{\bar{Z}_{1L}}{\bar{Z}_c}$	$\bar{Z}_{1L} + \bar{Z}_{2L} \frac{\bar{Z}_{1L}\bar{Z}_{2L}}{\bar{Z}_c}$	$\frac{1}{\bar{Z}_c}$	$1 + \frac{\bar{Z}_{2L}}{\bar{Z}_c}$

Коэффициент затухания в зависимости от конкретных условий может иметь сильно различающиеся значения для одного и того же фильтра. Один и тот же фильтр при различных условиях, т.е. в зависимости от значения и частотных характеристик полных сопротивлений источника  $\bar{Z}_Q$  и приемника  $\bar{Z}_S$ , может вызвать сильно различающееся затухание. Поэтому практически невозможно задать общую характеристику фильтра независимо от конкретных условий. Фактическая эффективность фильтра определяется лишь экспериментально в соответствии с (14) или же расчетным путем согласно (15), если точно известно соотношение полных сопротивлений  $\bar{Z}_Q$  и  $\bar{Z}_S$ .

## Аппаратура для измерений

Источником синусоидального сигнала является генератор ГЗ-33. Он генерирует синусоидальное напряжение амплитудой до 30 В и частотой от 20 Гц до 0,2 МГц. Регистрация напряжения осуществляется цифровым осциллографом, подключенным к компьютеру. В качестве модели сетевого помехоподавляющего фильтра используется набор элементов  $L$  и  $C$ , позволяющий соединить схемы помехоподавляющих фильтров, приведенные в табл. 9, строки 1–5. (рис. 16). Кроме этого, измеряется коэффициент затухания у промышленного сетевого фильтра КФ-220-500D, который применяется для подавления импульсных помех в промышленной сети.

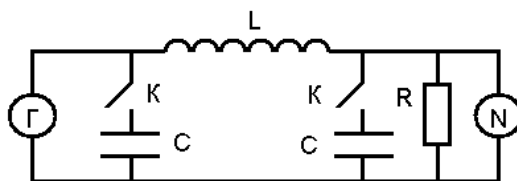


Рис. 16. Схема анализа простейших фильтровых структур:  
 $G$  – генератор синусоидальных импульсов ГЗ-33,  $K$  – переключатели,  
 $L, C$  – индуктивности и конденсаторы фильтра;  
 $R$  – сопротивление нагрузки,  $N$  – цифровой осциллограф

### Порядок работы

1. Измерить амплитуду исходного сигнала  $U_0$ .
2. Измерить напряжение для выбранной схемы фильтра на выходе фильтра  $U_\phi$  для 5–6 сигналов с разной частотой. Амплитуда исходного сигнала  $U_0$  остается неизменной. Данные занести в табл. 11.
3. Повторить измерения по п. 2 для других схем фильтра.
4. Посчитать по результатам измерений коэффициент затухания фильтра по (14).
5. Используя данные табл. 10, рассчитать по (15) коэффициент затухания  $a_\phi$ . Данные для расчета:  $Z_s$ , Ом;  $C$ , мкФ;  $L$ , Гн;  $Z_q$ , Ом выбираются из условий эксперимента.
6. Построить расчетные и экспериментальные зависимости  $a_\phi = f(\lg f)$ . По экспериментальным графикам определить частоту среза фильтра.
7. Объяснить полученные результаты.
8. Ответить на контрольные вопросы.

Таблица 11

№ п/п	$U_\phi$ , В	$f$ , Гц	$\lg(f)$	$a_\phi$ , дБ (эксп)	$a_\phi$ , дБ (расч)	Схема фильтра	Примечание
							$U_0 =$ В
							$f_{cp} =$ Гц

## Контрольные вопросы

1. Когда возможно применение помехоподавляющих фильтров?
2. В чем заключается принцип действия помехоподавляющих фильтров?
3. От каких факторов зависит коэффициент затухания фильтра?
4. Чем определяется выбор схемы фильтра?

## 5. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИОПОМЕХ ОТ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Цель работы: ознакомиться с причинами появления радиопомех от высоковольтного оборудования и мерами по их ограничению, допустимыми нормами и аппаратурой для измерения.

### Краткие сведения

Коронный разряд, или корона – это самостоятельный разряд, возникающий в резконеоднородных полях, в которых ионизационные процессы могут происходить только в узкой области вблизи электродов. К таким полям относится и электрическое поле проводов воздушных линий электропередачи.

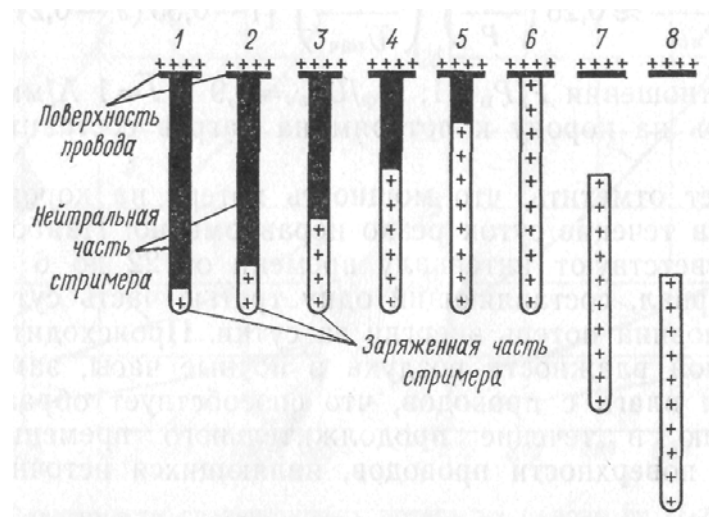
При больших диаметрах проводов напряженность электрического поля в окрестности провода уменьшается значительно медленнее, чем вблизи проводов малого диаметра, поэтому зона ионизации – «чехол» короны – имеет бóльшие размеры, и даже при начальном напряжении лавины могут достигать критической длины. Корона в этом случае возникает сразу в стримерной форме; структура зоны ионизации дискретна, светятся многочисленные стримерные каналы (рис. 17).



*Рис. 17. Стримерная корона на провода (экспозиция 1 с)*

Локальные разряды на поверхности проводов ВЛ не стабильны, но происходят в виде следующих одна за другой вспышек, вызывающих протекание импульсов тока разрядов. При отрицательной полярности

напряжения эти вспышки имеют длительность порядка  $10^{-8}$  с и амплитуду  $10^{-2}$  А. При положительной полярности напряжения, наряду с аналогичными импульсами, наблюдаются импульсы с амплитудой порядка десятых долей ампера и длительностью порядка десятых долей микросекунды, вызываемых развитием стримеров. Стримеры развиваются в сильном электрическом поле провода со скоростью  $10^6 \dots 10^7$  м/с и достигают длины 3...5 см. Число положительных и отрицательных зарядов (положительных ионов и электронов) в стримере одинаково за исключением кончика стримера, который содержит небольшой положительный заряд. Электроны движутся вдоль стримера со скоростью примерно  $10^5$  м/с, что приводит к образованию избыточного положительного заряда, который как бы продвигается от кончика стримера к поверхности провода (рис. 18). При указанной длине стримеров время образования избыточного положительного заряда составляет 0,3...0,5 мкс.



*Рис. 18. Примерная картина образования объемного заряда в поле коронирующего провода в последовательные моменты времени  $t$ , отсчитываемые от момента развития стримера:  
 1 – 0,05 мкс; 2 – 0,1 мкс; 3 – 0,2 мкс; 4 – 0,3 мкс; 5 – 0,4 мкс;  
 6 – 0,5 мкс; 7 – 50 мкс; 8 – 150 мкс*

Появление избыточного положительного заряда связано с протеканием тока смещения в пространстве, окружающем место развития стримера, и с протеканием тока вдоль провода, что является причиной возникновения и распространения вдоль линии электромагнитной волны.

Образовавшийся положительный объемный заряд перемещается от поверхности провода со скоростью  $v \approx 2 \cdot 10^4$  Е, что вблизи поверхности провода составляет  $(2 \dots 6) \cdot 10^2$  м/с. Следующий стример развивается только после устранения этого заряда из зоны высокой напряженности вблизи провода.

Спектр частот излучения, создающий радиопомехи, охватывает диапазон от 10 кГц до 1 ГГц. Помехи на частоте выше 30 МГц оказывают мешающее влияние на телеприем и возникают только при коронировании линий 750 кВ. Источниками радиопомех в этом случае помимо короны на проводах служат частичные разряды в зазорах и трещинах изоляторов и корона на заостренных элементах арматуры. В хорошую погоду корона на проводах практически не создает помех телевизионному приему.

Интенсивность радиопомех характеризуется вертикальной составляющей электрического поля вблизи поверхности земли  $E$ . Уровень радиопомех определяется величиной:

$$Y = 20 \lg E, \quad (16)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля, мкВ/м.

В качестве расчетной частоты принимается  $f = 0,5$  МГц. Допустимый уровень радиопомех в хорошую погоду составляет 40 дБ, что в соответствие с (5.1) дает  $E = 100$  мкВ/м. Это значение напряженности электрического поля принято в качестве допустимого на расстоянии 100 м от проекции крайнего провода линии электропередачи напряжением 300 кВ и выше.

Увеличение радиуса проводов при неизменной напряженности поля на них приводит к росту уровня радиопомех, поскольку спад напряженности поля у провода в радиальном направлении при этом замедляется, и создаются условия для развития более интенсивной стримерной короны. Радиопомехи практически не зависят от числа составляющих в фазе, так как происходит взаимное электромагнитное экранирование проводов фазы. На величину радиопомех оказывают влияние ряд факторов, основные из которых: радиус проводов, погодные условия, состояние поверхности провода, степень загрязненности атмосферы. Дождь, мокрый снег повышают уровень радиопомех на 10 дБ, сухой снег, изморось – на 5 дБ. При включении новых линий радиопомехи примерно в 4–5 раз выше, чем от линий с состарившимися проводами. Полное старение проводов в основном заканчивается через 4...5 лет эксплуатации.

Методы измерений и нормы на уровень радиопомех от ВЛ и ПС регламентируются ГОСТ 22012–92 с учетом требований ГОСТ 16842–92 на общие методы испытаний источников радиопомех. Квазипиковые значения напряженности поля радиопомех (в децибеллах относительно 1 мкВ/м) в полосе частот 0,15...30 МГц не должны превышать указанных на рис. 19.



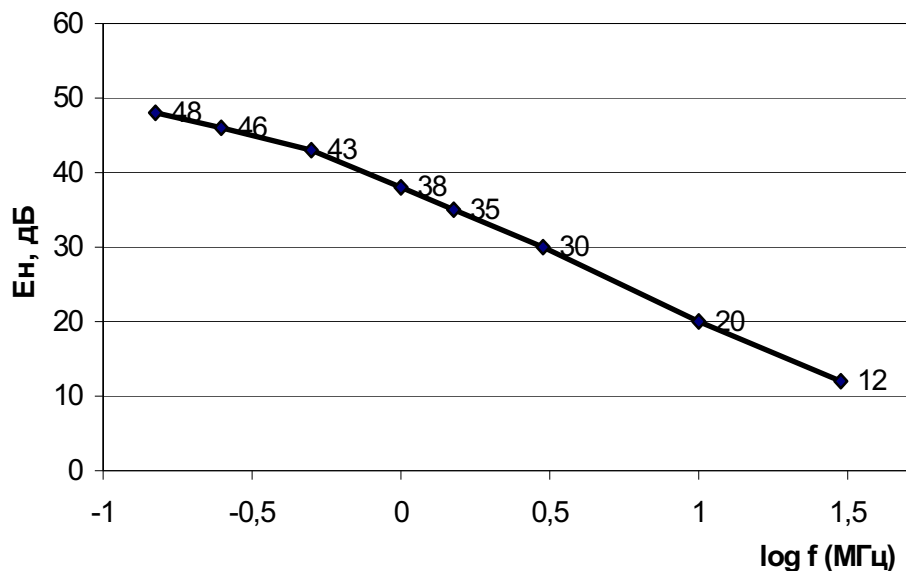


Рис. 19. Допустимые квазитиковые значения напряженности поля радиопомех

В диапазоне 30...1000 МГц уровень радиопомех не должен превышать 30 дБ. Измерения радиопомех производят с помощью измерителей радиопомех и антенн по ГОСТ 11001–80. Измерения помех на ВЛ производят вдали от ПС и иных источников помех: других ВЛ и дорог с движущимся автотранспортом. Измерения производят в двух местах. В середине пролета помехи измеряют в полосе частот 0,15...30 МГц, характерной для короны на проводах. Напротив опор измерения проводят в полосе 30...1000 МГц, в которой преимущественный вклад дают частичные разряды внутри и на поверхности изоляторов.

Измерения проводят при различных погодных условиях (сухая погода, дождь, снегопад). Процентное отношение числа измерений радиопомех должно соответствовать среднегодовому отношению этих категорий погоды в данном районе. Общее число измерений на каждой частоте должно быть не менее 15. Статистическая обработка результатов при числе измерений не менее 15 проводится по ГОСТ 16842–82. Для сравнения с нормой используют значение уровня помех при вероятности 0,8. ВЛ и ПС удовлетворяют нормам, если  $E_{0,8} \leq E_n$ . Это означает, что в течение года не менее 80 % значений напряженности поля радиопомех с доверительной вероятностью не менее 0,8 соответствуют нормам.

В сокращенном варианте допускается проводить измерения радиопомех от ВЛ при однократным выезде, причем только в сухую погоду. При этом считается, что ВЛ соответствует нормам, если на каждой час-

тоте измерения:  $E_i \leq (E_H - 3 \text{ дБ})$  в полосе частот 0,15...30 МГц и  $E_i \leq E_H$  при частотах 30...1000 МГц.

### Аппаратура для измерений

Измеритель напряженности поля (ИНП) ПЗ-21 предназначен для измерения среднеквадратических значений напряженности электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля (ЭМП) в режимах непрерывной генерации, амплитудной, частотной и импульсной модуляции. Диапазон частот измерителя при измерении среднеквадратических значений напряженности ЭМП в диапазоне 1...1000 В/м при частотах от 10 кГц до 300 МГц для электрической составляющей поля в диапазоне от 0,5 до 16 А/м на частотах от 10 кГц до 30 МГц для магнитной составляющей поля.

Основные области применения: пространственное обследование интенсивности ВЧ излучения в ближней зоне мощных ВЧ установок в широкой полосе спектра и контроль биологически опасных уровней ВЧ излучений на рабочих местах персонала, обслуживающего электрорадиотехнические установки и системы, излучающие электромагнитное поле.

Измеритель напряженности поля ПЗ-21 (рис. 20) состоит из комплекта антенн-преобразователей (табл. 12), индикатора ИПН ПЗ-21, устройства зарядного и блока питания аккумуляторного ИНП ПЗ-21. Работа ИНП основана на преобразовании индуцированных ВЧ сигналов на системе взаимно-ортогональных «электрически малых» антенн в постоянный ток квадратичными детекторами, встроенными в каждую антенну, и отсчете суммарного сигнала, пропорционального интенсивности ЭМП, индикаторным блоком, где происходит отсчет измеряемой величины в дБ.

Таблица 12

Тип антенны преобразователя	Пределы измерений
АП-Е-1	1–14 В/м
АП-Е-2	10–140 В/м
АП-Е-3	70–100 В/м
АП-Н-1	0,5–16 А/м



Рис. 20. Внешний вид измерителя напряженности поля ПЗ-21:  
 1 – Индикатор ИПН ПЗ-21; 2 – устройство зарядное,  
 3 – блок питания аккумуляторный; 4 – соединительные кабели

### Подготовка к проведению измерений

Подключить блок питания аккумуляторный к индикатору ИПН ПЗ-21, расположенный на боковой панели индикатора.

Подключить к индикатору антенну-преобразователь, пределы измерения которой соответствуют предполагаемому уровню измеряемой напряженности ЭМП.

Перевести переключатель «Род работы» в положение «▼ 1» и произвести калибровку измерителя, для чего:

Удалить измеритель из ЭМП.

Установить показания индикатора 24 дБ регулировкой ручки «▼ 1».

Перевести переключатель «Род работы» в положение «▼ 2» и регулировкой резисторов «▼ 2 грубо» «▼ 2» установить показания индикатора 6,3 дБ.

Установить переключатель «Род работы» в положение «▲».

### Проведение измерений

При внесении антенны-преобразователя в измеряемое ЭМП на индикаторе появляются показания, соответствующие уровню измеряемого поля. Рабочий диапазон показаний индикатора от 3 до 26 дБ для АП-Е-поля и от 3 до 33 дБ для АП-Н-1. Время установления показаний измерителя не более 25 с.

Произвести ориентацию антенны-преобразователя таким образом, чтобы ось ручки АП совпала с направлением вектора напряженности поля. Если погрешность измерения  $\pm 3,0$  дБ является достаточной, ориентирование антенны-преобразователя можно не проводить.

Абсолютное значение напряженности поля определяется по формуле:

$$A_x = A_0 \cdot 10^{\frac{A}{20}}, \text{ В/м; А/м,} \quad (17)$$

где  $A = A_u + K_f + K_t - 3$ ,

$A_0$  – соответствует значению:

1 В/м для АП-Е-1

10 В/м для АП-Е-2

70 В/м для АП-Е-3

0,5 А/м для АП-Н-1

$A_u$  – показания индикатора ИНП ПЗ-21, дБ;

$K_f$  – значение поправочного коэффициента амплитудно-частотной характеристики в диапазоне частот от 10 до 100 кГц, дБ;

$K_t$  – коэффициент температурной зависимости измерителя, дБ.

Поскольку уровень радиопомех нормируется в диапазоне 0,15...1000 МГц, то коэффициент  $K_f = 0$ .

Коэффициент  $K_t$  в дБ определяется по рис. 21.

### Порядок работы

1. Ознакомиться с устройством и порядком работы с прибором ПЗ-21.
2. Измерить напряженность поля и рассчитать по формулам (16) и (17) уровень радиопомех от коронирующего провода (для 3-х проводов разного диаметра) при 6–7 значениях напряжения. Результаты занести в табл. 13.
3. Построить по полученным данным зависимости уровня радиопомех от напряжения на проводе  $Y = f(U)$ . Объяснить полученные результаты.

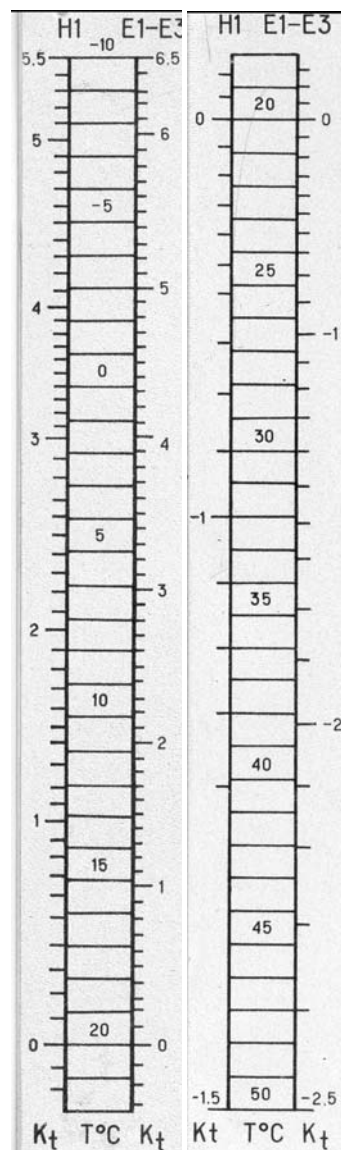


Рис. 21. Диаграммы для определения  $K_t$

Таблица 5.2

№ п/п	$d$ , мм	$U$ , кВ	$A_u$ , дБ	$A_x$ , В/м	$Y$ , дБ	Примечание
						$K_t =$

## Контрольные вопросы

1. Что является причиной появления радиопомех в сетях высокого напряжения?
2. От каких факторов зависит уровень радиопомех?
3. Как погодные условия влияют на уровень радиопомех?
4. Перечислите основные мероприятия, применяемые в электроэнергетике для снижения радиопомех.

## 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: ознакомиться с видами, характеристиками и принципом действия низковольтных ограничителей напряжения, исследовать их защитные характеристики.

Применяемые для защиты аппаратуры ограничители напряжений делятся по принципу действия на два класса: газоразрядные и полупроводниковые. К первым относятся искровые разрядники, ко вторым – металлооксидные варисторы и полупроводниковые ограничители. Каждый тип ограничителя имеет предпочтительные области применения, которые определяются характеристиками приборов (табл. 14): вольтамперной характеристикой (ВАХ), номинальными напряжениями и токами, перегрузочной способностью, быстродействием и др.

Таблица 14

*Основные характеристики ограничителей напряжения*

Характеристики	Диапазон значений для различных ограничителей		
	Газонаполненные разрядники	Варисторы	П/п ограничители
Рабочие напряжения, В	$10^1 \dots 1,2 \cdot 10^4$	$10^1 \dots 2 \cdot 10^3$	3...600
Импульсные токи, А	$10^2 \dots 2 \cdot 10^5$	$10^2 \dots 10^5$	$10^1 \dots 10^3$
Максимальная поглощаемая энергия, Дж	60	2000	0,1
Время срабатывания, с	$10^{-6} \dots 10^{-5}$	$10^{-9} \dots 10^{-8}$	$10^{-11} \dots 10^{-9}$
Межэлектродные емкости, пФ	2 ... 30	200 ... 20000	10 ... 10000
Защитное действие	Грубая защита		Тонкая защита

**Разрядники.** До недавнего времени разрядники были абсолютными «рекордсменами» среди других защитных устройств по величине

нам номинальных напряжений, коммутируемым энергиям и токам. Они имеют очень небольшие емкости межэлектродного промежутка, что важно, например, для сохранения высокочастотных свойств защищаемых цепей. Разрядники применяются для защиты входных и выходных цепей РЗ и ПА, антенн и линий связи, источников питания и т.д. от естественных и искусственных источников перенапряжений практически всех видов. Разрядникам свойственны два недостатка. Во-первых, при большой крутизне нарастания напряжение перед срабатыванием может на короткое время принимать очень большие значения по сравнению со статическим напряжением пробоя искрового промежутка.

Динамическое напряжение пробоя можно оценить согласно выражению:

$$U_{\text{дин.}} = U_{\text{ст.}} + t_3 (dU/dt), \quad (18)$$

где  $U_{\text{ст.}}$  – статическое напряжение пробоя;  $t_3$  – время запаздывания возникновения разряда;  $dU/dt$  – скорость нарастания напряжения.

Во-вторых, напряжение горения разряда при срабатывании бывает меньше рабочего напряжения в защищаемой цепи и разряд может гореть и после времени воздействия помехи. В низкоомных цепях сопровождающий ток может привести к выходу из строя разрядника из-за термического разрушения.

Первый недостаток в некоторой мере можно решить подбором типа разрядника с требуемой вольт – секундной характеристикой либо ступенчатой или тонкой защитой (см. ниже). Вторая проблема решается путем последовательного подключения к разряднику варистора.

**Варисторы** – это нелинейные резисторы, изготавливаемые на основе окиси цинка, сопротивление которых зависит от напряжения. Вольт-амперная характеристика в рабочей области (рис. 22, б) приближенно описывается выражением:

$$I = K U^\alpha. \quad (19)$$

Коэффициент  $K$  зависит от размеров (диаметра и толщины диска), а показатель степени  $\alpha$  ( $\alpha > 25$ ) зависит от материала варистора. Характеристика симметрична по отношению к полярности напряжения.

За пределами рабочей области появляются отклонения от степенной зависимости, обусловленные токами утечки (при малых токах) и остаточного сопротивления зерен материала (при больших токах).

При быстрых изменениях напряжения в схему замещения варистора (рис. 22, в) необходимо ввести, как минимум, последовательно включенную индуктивность и параллельно включенную емкость. Индуктивность обусловлена индуктивностями выводов варистора и, в определен-

ной мере, отражает следствия явлений поверхностного эффекта инерции инжекции зарядов через границы зерен. Емкость  $C_{\text{ПАР}}$  обусловлена высокой относительной диэлектрической проницаемостью материала ( $\epsilon_r = 1200$ ) и находится в диапазоне от ста до десятков тысяч пикофард в зависимости от нагрузочной способности варистора. Влияние емкости препятствует применению варисторов при высокой частоте, но этот недостаток можно преодолеть последовательным включением диодов с малой емкостью.

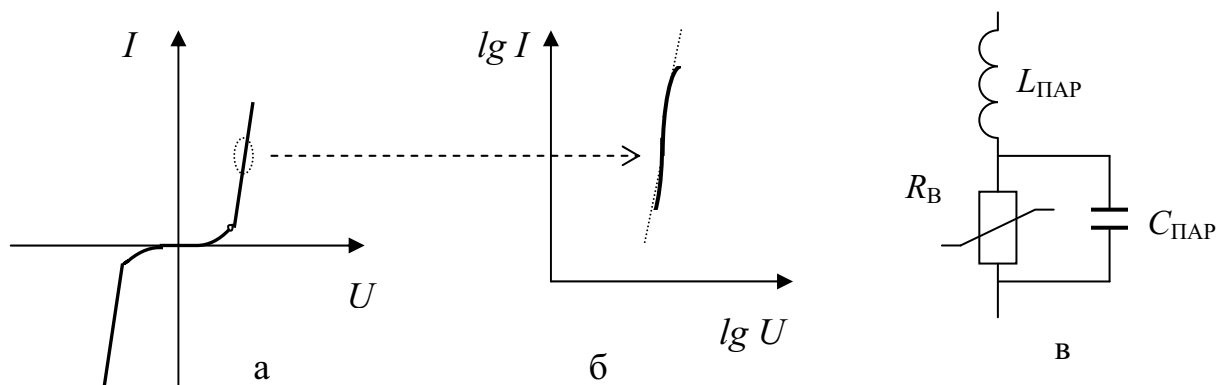


Рис. 22. Полная вольт-амперная характеристика (а), ее фрагмент в рабочей области (б) и схема замещения варистора (в)

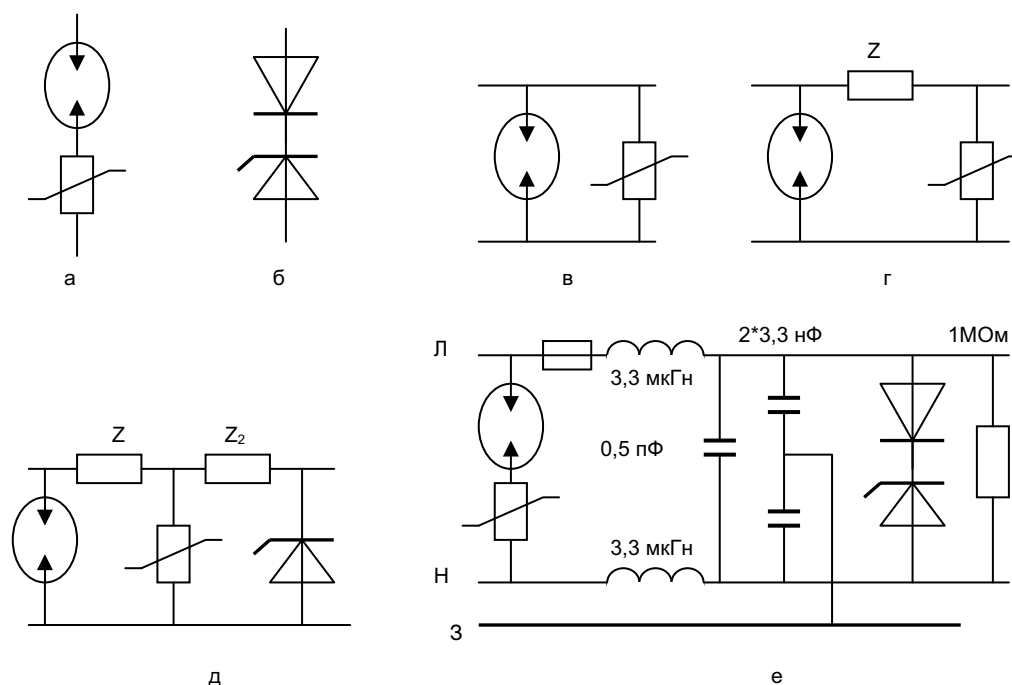
Выбор варистора проводится в несколько этапов:

- выбор типа варистора по заданному номинальному напряжению;
- определение размеров в зависимости от токовой нагрузки: максимальный импульсный ток вычисляется с учетом переходного напряжения и внутреннего сопротивления источника помех. Максимально допустимая токовая нагрузка зависит от числа срабатываний варисторов за время срока службы;
- определение размеров варистора по способности поглощать энергию импульсов тока и рассеивать ее в виде тепла. При однократном нагружении разные варисторы способны поглотить от 0,1 Дж до 10 кДж. При повторяющихся срабатываниях эти значения могут быть на несколько порядков меньше;
- определение размеров варистора по мощности  $P$  при воздействиях перенапряжений с энергией  $W$ , повторяющихся с частотой  $F$ :  $P = W \cdot F$ . В зависимости от конструкции варистора предельные нагрузки составляют 0,01...2 Вт;
- проверка уровня защиты. Если известен максимальный импульсный ток, то остаточное напряжение на варисторе можно определить из вольт-амперной характеристики; оно должно быть ниже

значения электрической прочности защищаемого устройства. Если максимальный ток неизвестен, то исходят из остаточного напряжения и рассчитывают приближенное значение тока, и уточняя остаточное напряжение. Многократное повторение этих вычислений дает искомое остаточное напряжение.

В качестве **полупроводниковых ограничителей напряжения** используют диоды: выпрямительные, лавинные, импульсные, стабилитроны и стабисторы, ограничительные и переключаательные  $p-i-n$  диоды, диоды Шоттки, дефензоры.

**Комбинированные ограничители напряжения.** Схемы некоторых комбинированных (гибридных) ограничителей напряжения приведены на рис. 23.



*Рис. 23. Схемы комбинированных ограничителей: последовательное включение разрядника и варистора (а), помехоподавляющего и малоемкостного диода (б); параллельное включение разрядника и варистора, прямое (в) и косвенное(г); трехступенчатая защита (д) и сетевой защитный фильтр (е)*

Последовательное соединение разрядника с варистором (рис. 23, а), с одной стороны, способствует гашению сопровождающего тока через разрядник после его срабатывания. С другой стороны, разрядник исключает протекание тока через варистор в нормальном эксплуатационном режиме, что позволяет оптимизировать уровень ограничения и уменьшить размеры варистора.



Для устранения влияния большой емкости одно- или двунаправленных стабилитронов (диодов Зенера) последовательно с ними включают малоемкостные диоды (рис. 23, б). Параллельное соединение разрядника и варистора (рис. 23, в) обеспечивает требуемое быстродействие при условии, что в первые моменты времени перенапряжение ограничивается только варистором. После времени запаздывания срабатывает разрядник и «берет на себя» всю оставшуюся часть энергии помехи.

Для более глубокого ограничения помех используют развязку ограничителей резистором или дросселем (рис. 23, г). Дальнейшего повышения эффективности подавления помех можно достичь в многоступенчатых схемах с применением ограничителей нескольких типов, разделенных резисторами и дросселями (рис. 23, д) или фильтрами нижних частот (рис. 23, е).

### Аппаратура для измерений

Источником синусоидального сигнала является генератор ГЗ-123. Он генерирует синусоидальное напряжение амплитудой до 200 В и частотой от 1 Гц до 0,3 МГц.

Регистрация импульсов осуществляется цифровым осциллографом PSC500A, совмещенным с компьютером.

### Порядок работы

1. Измерить 8–10 значений напряжения и времени срабатывания для выбранного типа ограничителя напряжения при различных частотах. Результаты занести в табл. 15.
2. Повторить измерения для другого типа ограничителя напряжения.
3. Построить зависимости  $U_c=f(t_c)$  по результатам измерений. Объяснить полученные результаты.

Таблица 15

№ п/п	f, Гц	$U_c$ , В	$t_c$ , мкс	Примечания

### Контрольные вопросы

1. Назовите область применения ограничителей напряжения.
2. Перечислите достоинства и недостатки газонаполненных разрядников.
3. Перечислите достоинства и недостатки варисторов.
4. Дайте определение тонкой и грубой защиты.

## Список литературы

1. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике. – М.: Энергоатомиздат. –1995. – 304 с.
2. Александров Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 360 с.
3. Уилльямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2003. – 540 с.
4. Уилльямс Т., Армстронг К. ЭМС для систем и установок. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2004. – 508 с.
5. Шваб А.Й. Электромагнитная совместимость. – М.: Энергоатомиздат. – 1998. – 480 с.
6. Журавлев Э.Н. Радиопомехи от коронирующих линий электропередачи. – М.: Энергия. – 1971. – 200 с.
7. СанПиН 2.2.4.1191–03 Электромагнитные поля в производственных условиях.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Измерение напряженности электрического поля промышленной частоты, создаваемого установками высокого напряжения .....	3
2. Измерение напряженности магнитного поля промышленной частоты от технических средств .....	12
3. Изучение каналов распространения электромагнитных помех .....	20
4. Определение коэффициента затухания сетевого помехоподавляющего фильтра .....	28
5. Измерение радиопомех от высоковольтного оборудования.....	38
6. Исследование защитных характеристик ограничителей напряжения .....	45
7. Список литературы .....	50

Учебное издание

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ТЕХНИКИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Современные проблемы электроэнергетики» для магистран-  
тов, обучающихся по направлению 140200 «Электроэнергетика»

*Составитель*

Жгун Дмитрий Владимирович

Научный редактор,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

*В.В. Лопатин*

Редактор

*А.В. Высоцкая*

Верстка

*Д.В. Сотникова*

Дизайн обложки

*О.Ю. Аршинова  
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 09.06.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать Хегох. Усл. печ. л. 3,08. Уч.-изд. л. 2,74.

Заказ 777. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.