

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 16:42:21

Уникальный программный ключ: «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «Электромагнитная совместимость в электроэнергетических
системах»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и
электротехника Передача и распределение электрической энергии в системах
электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах» разработаны для студентов по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения.

В методических указаниях приводятся задания и вопросы к каждому практическому занятию.

Составители: канд. физ.-мат.наук Ростова А.Т.

Рецензент: док. тех. наук, профессор Ковалев В.Д.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1 Способы воздействия и пути передачи электромагнитных помех

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2 Описание электромагнитных влияний в частотной и временной областях

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3 Разряды статического электричества

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4 Уровни помех. Использование ЭМС-номограммы при описании помех

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5 Помехозащитные устройства. Экранирование

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6 Помехозащитные устройства. Фильтры

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7 Электромагнитная обстановка на энергетических и промышленных объектах

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8 Нормирование условий работы персонала и проживания людей в зоне влияния ПС и ВЛ СВН

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №9 Качество электрической энергии и его обеспечение

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Целью данных практических занятий является создание у студентов, специализирующихся в области электроснабжения промышленных предприятий, достаточно полного представления о трудностях, возникающих при внедрении современных цифровых вторичных систем в электроэнергетике, как выявить источники помех, испытать и обеспечить заданную помехоустойчивость вторичных систем.

Практические работы направлены на создание у студентов ясного представления о допустимых нормах напряженности электрического и магнитного полей, а также о нормативной базе требований ЭМС.

Студент должен научиться с помощью технической документации и литературы разбираться в работе систем фильтрации сигналов, применяемых в различных электроэнергетических устройствах для обеспечения помехоустойчивости, и пользоваться справочной литературой для выбора необходимых параметров электромагнитных экранов и фильтров.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

Тема: Способы воздействия и пути передачи электромагнитных помех

Цель: изучить механизмы распространения электромагнитных помех

Знания и умения: знать виды и источники помех и чувствительные к помехам элементы вторичных систем электроэнергетики, уметь выявлять источников электромагнитных помех

Актуальность темы: получить необходимые представления о трудностях, возникающих при внедрении современных цифровых вторичных систем в электроэнергетике.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В зависимости от механизма распространения между источником и приёмником (подверженными влиянию цепями и аппаратурой), ЭМП могут разделяться на ёмкостные, индуктивные и кондуктивные. При воздействии высокочастотного электромагнитного поля в данной зоне говорят еще о наведённых электромагнитных помехах.

Ёмкостными и индуктивными называют ЭМП, распространяющиеся в виде соответственно электрического и магнитного полей в непроводящих средах. Кондуктивные ЭМП – это помехи, возникающие в общих цепях, например, в заземлении или любых металлических конструкциях и распространяющиеся по элементам электрической сети. Кондуктивные помехи в цепях, имеющих более одного проводника, принято делить на помехи «провод-земля» (синонимы – несимметричные, общего вида, Common Mode) и «провод-провод» (симметричные, дифференциального вида, Differential Mode). В первом случае («провод-земля») напряжение помехи приложено, как следует из названия, между всеми проводниками цепи и землёй. Во втором – между различными проводниками одной цепи. Рассмотрим основные пути передачи электромагнитных помех:

1. **Гальваническая связь.** Гальваническая или металлическая связь появляется тогда, когда два электрических контура имеют общее сопротивление Z , будь то участок провода, сопротивление связи или двухполюсник иного вида.

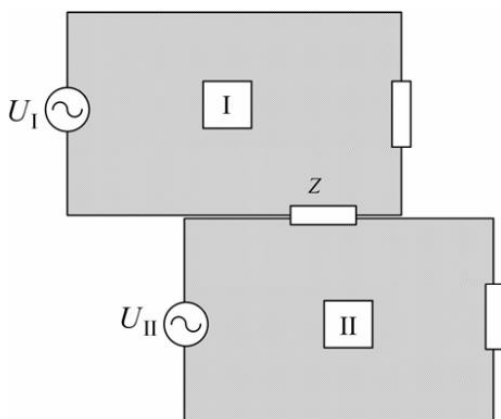


Рисунок 1 – Гальванический путь передачи ЭМС

2. **Ёмкостная связь.** Ёмкостная связь возникает между двумя контурами, проводники которых находятся под различными потенциалами.

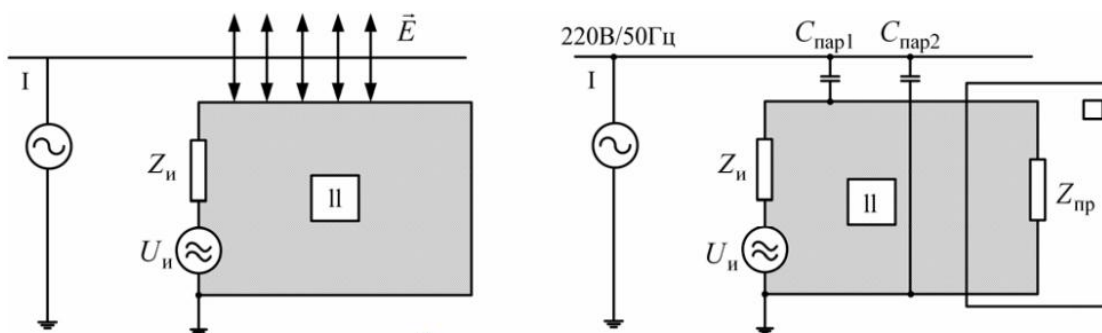


Рисунок 2 – Ёмкостной путь передачи ЭМС

3. **Магнитная связь.** Магнитная или индуктивная связь возникает между двумя или несколькими контурами тока.

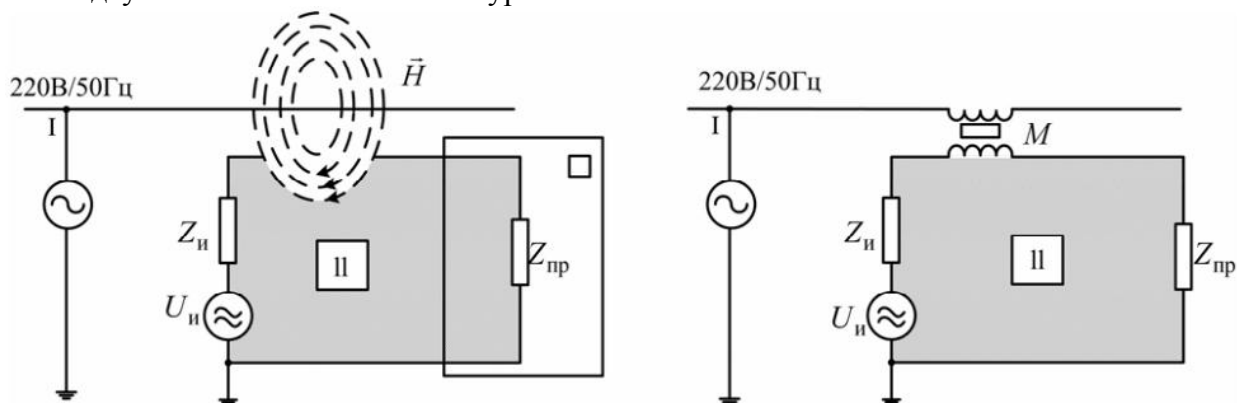


Рисунок 3 – Индуктивный путь передачи ЭМП

4. **Связь через электромагнитное излучение.** Осуществляется посредством электромагнитных волн, порождённых каким-либо передатчиком (рисунок 5).



Рисунок 5- Связь через электромагнитное излучение

Внутри прибора электромагнитные помехи могут попасть совместно с полезными сигналами или с напряжением питания по проводам (U , I), либо полевым путем (E , H), а также через антенны. В дополнение к этим помехам, вызванным внешними источниками, могут возникнуть и внутренние помехи, распространяющиеся по проводам или в виде поля внутри системы. Не следует забывать, что прибор автоматизации может быть одновременно и чувствительным к помехам, и сам излучать помехи (рисунок 6)

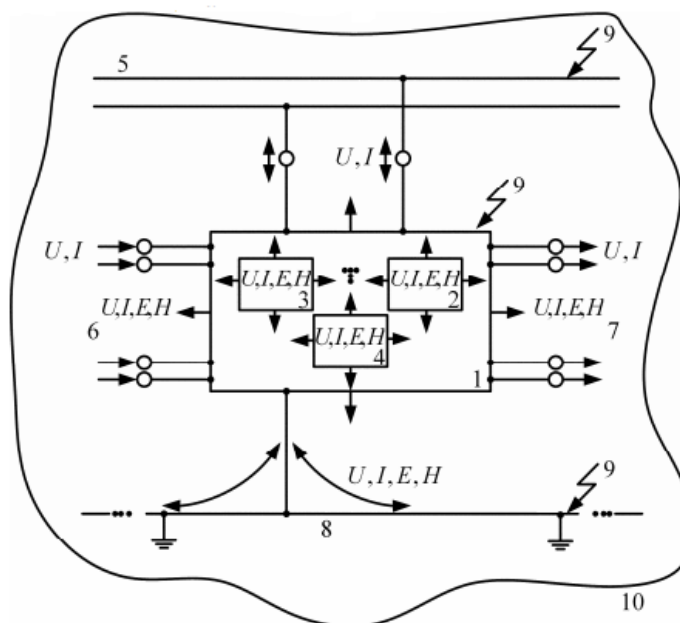


Рисунок 6 - Внешние и внутренние источники помех, виды помех, поступающих в устройство и исходящих из него помех: 1 – прибор автоматизации; 2, 3, 4 – элементы прибора автоматизации, внутренние источники ЭМП; 5 – сеть электропитания; 6 – информационные входы; 7 – информационные выходы; 8 – заземление; 9 – ЭМП, передающиеся по контуру заземления, разряды статического электричества, короткие замыкания в питающей сети; 10 – электромагнитная обстановка.

Причинами появления внутренних помех в системе обычно являются: напряжение питания с частотой 50 Гц; изменения потенциала в сетевых проводах питания устройств электроники; изменения сигналов в проводах управления или линиях передачи данных; высокочастотные или низкочастотные тактовые сигналы; коммутационные процессы в индуктивностях, например, в герконах на печатных платах; магнитные поля ходовых механизмов с накопителями энергии; искровые разряды при замыканиях и размыканиях контактов; резонансные явления при замыкании контактов. Кроме того, в устройствах автоматизации могут возникнуть и другие электрические факторы, которые станут причиной нарушения функционирования: это переходные сопротивления в контактах; шумы активных и пассивных элементов; дрейф параметров элементов; разброс времени коммутации в логических устройствах; исчезновения сигналов при передаче; явления отражения в линиях; вибрации и микрофонный эффект в контактах; пьезоэлектрические смещения зарядов при сжатии и изгибах изоляции; контактные напряжения; схемозлектрические и термоэлектрические эффекты в точках соединения проводников из различных материалов (например, каждое место спайки, скрутки или резьбовое соединение двух различных материалов представляет собой термоэлемент, термонапряжение которого изменяется примерно до 40 мкВ при изменении температуры на 1°C). Эти возможные паразитные эффекты необходимо учитывать при разработке и изготовлении электронных средств автоматизации и соответствующими мерами, например, подавлением, нужно ограничить их влияние.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите причины появления внутренних помех в системе.
2. Перечислите внешние и внутренние источники помех, виды помех, поступающих в устройство и исходящих из него помех.
3. Поясните основные механизмы распространения помех.

Список литературы:

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. Ф. Шаталов, И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 64 с. — 978-5-9596-1058-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47397.html>
2. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебник для вузов / А.Ф. Дьяков [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — М. : Издательский дом МЭИ, 2016. — 543 с. — 978-5-383-00973-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55879.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

Тема: Описание электромагнитных влияний в частотной и временной областях

Цель: изучить представление периодических и непериодических функций времени в частотной области.

Знания и умения: пересчет периодических процессов из временной области в частотную при помощи ряда Фурье и пересчет однократных импульсных процессов - при помощи интеграла Фурье.

Актуальность темы: получить необходимые знания для проведения расчетов технических средств защиты от помех

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Представление периодических функций времени в частотной области. Ряд Фурье.

Синусоидальные или косинусоидальные помехи (гармонические процессы) могут быть представлены как во временной, так и в частотной областях непосредственно (рис.1). В частотной области помеха характеризуется угловой частотой ω и частотой колебаний $f = \omega / 2\pi$.

Несинусоидальные периодические функции - например, пилообразной или прямоугольной формы импульсы напряжения или тока выпрямителей которые, в некоторых случаях, возможно описать аналитически, - могут быть представлены в частотной области как бесконечная сумма синусоидальных и косинусоидальных колебаний, т. е. рядом Фурье.

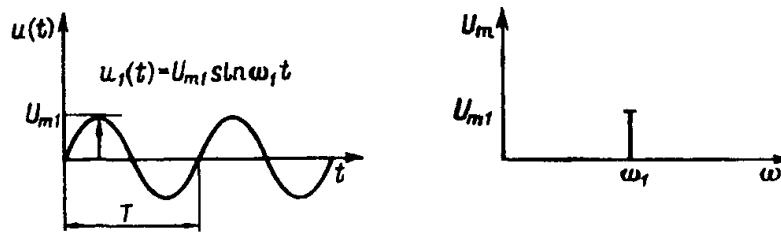


Рисунок 1 – Представление синусоидальной помехи во временной и частотной областях

Например, можно представить себе несимметричное напряжение прямоугольной формы возникшим как наложение основного колебания u основной частоты $f_1 = 1/T$ и бесконечно многих гармонических колебаний u_n с частотами $n f_1$. Зависимость амплитуды отдельных колебаний от частоты представляет собой дискретный линейчатый спектр (рис. 2). Наименьшая встречающаяся в линейчатом спектре частота - основная частота.

Частоты высших гармоник являются значениями, кратными этой основной частоте, например $f_3 = 3 f_1$.

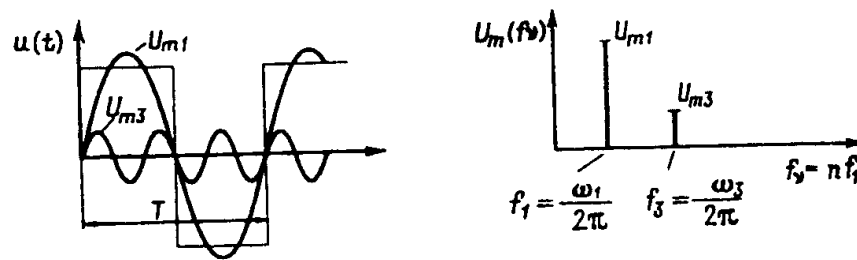


Рисунок 2 – Периодическая несинусоидальная функция

Аналитически ряд Фурье любой функции времени может быть представлен в различных формах:

Нормальная:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (U_n' \cos n\omega t + U_n'' \sin n\omega t),$$

$$U_n' = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(n\omega_1 t) dt, U_n'' = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(n\omega_1 t) dt, U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (1)$$

Коэффициенты U_n' и U_n'' - амплитуды отдельных колебаний. Составляющая U_0 соответствует среднему арифметическому значению функции времени (постоянная составляющая).

Амплитудно-фазовая: Так как синусоидальные колебания с соответствующим фазовым сдвигом могут быть представлены и как косинусоидальные, например $\sin(90^\circ \pm \alpha) = \cos \alpha$, вместо нормальной формы часто применяют амплитудно-фазовую форму:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n), \quad (2)$$

$$\text{где } U_n = \sqrt{U_n'^2 + U_n''^2}; \quad \varphi_n = -\arctg(U_n''/U_n')$$

Комплексная.

Если дополнять вышеприведенные уравнения мнимой частью и заменить тригонометрические функции по формуле Эйлера $\cos x + j \sin x = e^{jx}$ экспоненциальными функциями, получаем уравнение в комплексной форме:

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{C}_n e^{jn\omega_1 t} = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (\dot{C}_{+n} e^{jn\omega_1 t} + \dot{C}_{-n} e^{-jn\omega_1 t}), \quad (3)$$

$$\text{Где } \dot{C}_n(\pm n\omega_1) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt = |\dot{C}_n| e^{j\varphi_n} = C_n e^{j\varphi_n}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

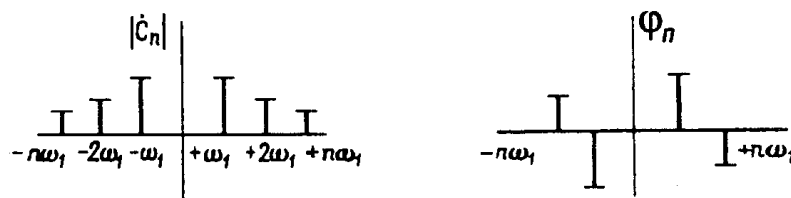


Рисунок 3 – Амплитудный и фазовый спектры комплексного ряда Фурье

Так как функция $u(t)$ будучи представленная комплексным рядом Фурье (3) остается действительной, то в правой части вводятся отрицательные частоты (чтобы мнимые части сократились). Учет отрицательных частот приводит к двустороннему спектру (рис.3). Идентичные вещественные части обоих слагаемых в (3) за знаком суммы (для положительных и отрицательных частот $\pm n\omega_1$) образуют физически измеримую амплитуду U_n , причем

$$|C_{+n}| + |C_{-n}| = U_n, \quad C_0 = U_0.$$

При анализе ЭМС вместо двустороннего математического спектра $\dot{C}_n = f(\pm n\omega_1)$ чаще всего рассчитывают односторонний «физический» спектр $2|\dot{C}_n| = f(\pm n\omega_1)$ только для положительных n , амплитуды которого отличаются на коэффициент 2 от амплитуд двустороннего спектра. Значения амплитуд одностороннего спектра измеримы, они совпадают со значениями коэффициентов косинусоидальной формы, т.е. соответствуют значительным частям векторов переменного напряжения той же частоты.

В заключение на рисунке 4 показаны импульсы прямоугольной формы двух периодически изменяющихся напряжений одной и той же основной частоты, однако различной скважности, и относящиеся к ним линейчатые спектры. Из вышесказанного можно установить следующее: наименьшая частота f_1 является основной частотой. Ее значение связано со значением периода T : $f_1 = 1/T$

Амплитуды высших гармоник появляются с одинаковым интервалом $\Delta f = f_1 = 1/T$ их частоты кратны основной частоте $f_n = n f_1$

Ряд Фурье для последовательности прямоугольных импульсов имеет вид:

$$u(t) = U_m \frac{\tau}{T} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T}{2n\pi\tau} \left(\sin \frac{2n\pi\tau}{T} \cos n\omega_1 t + \left(1 - \cos \frac{2n\pi\tau}{T} \right) \sin n\omega_1 t \right) \right]$$

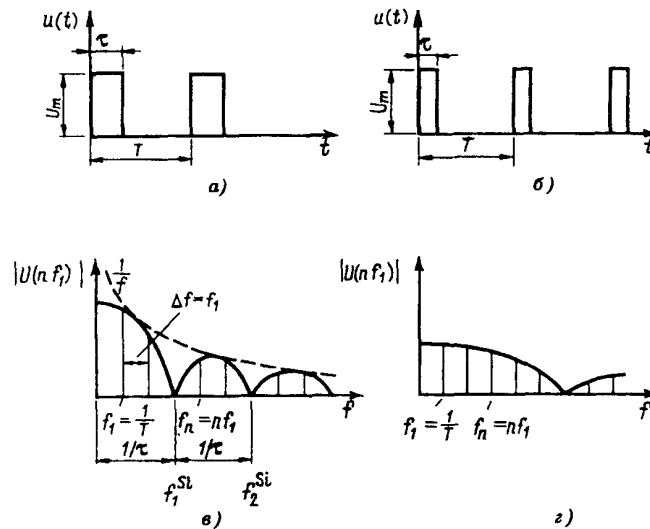


Рисунок 4 – Линеичатые спектры двух периодических последовательностей прямоугольных импульсов напряжений с личной скважностью (1:2): функция $Si(x)$ - огибающая спектральных амплитуд (сплошная кривая); функция $1/f$ - огибающая функции $Si(x)$ (пунктирная кривая)

Коэффициенты (спектральные амплитуды) (без постоянной составляющей) определяются формулой:

$$U_n = 2U_m \frac{\tau}{T} \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{(n\pi\tau/T)}$$

Огибающая спектральных амплитуд следует функции $Si(x) = \sin(x)/x$. Первое значение нуля этой функции соответствует обратной величине длительности импульса

$$f_1^{Si=0} = 1/\tau$$

Другие нулевые значения следуют с интервалом $nf_1^{Si=0}$. На практике нулевые значения появляются не столь явно выраженными, как на рисунке 4, так как из-за неизбежных асимметрий (например, экспоненциальных нарастаний и спада прямоугольных импульсов) они сглаживаются.

Постоянный коэффициент при функции $Si(x)$ равный $2U_m\tau/T$ при неизменном периоде пропорционален площади импульса $U_m\tau$. Таким образом, высокие узкие импульсы при низких частотах могут иметь такой же спектр, как низкие широкие. Поэтому в вышеприведенном примере спектральные амплитуды из-за меньшей на 50% площади импульсов имеют только половинное значение.

Огибающая амплитуд функции $Si(x)$ есть функция $1/x$. Для прямоугольных импульсов с бесконечно большой длительностью периода T спектральные линии и максимумы функции $Si(x)$ бесконечно сближаются. Получается известный спектр $1/f$ ступенчатой функции.

Подобным образом можно рассмотреть и другие формы импульсов с другими огибающими, например, треугольные импульсы, огибающая которых выражается функцией $Si^2(x)$

Представление непериодических функций времени в частотной области. Интеграл Фурье.

Ряд Фурье допускает представление в частотной области только периодических функций времени. Однако часто имеют дело с непериодическими функциями, характерными, например, для коммутационных процессов, молнии или разрядов статического электричества и т. д.

При определении спектра непериодической импульсной функции выполним предельный переход, воспользовавшись комплексной формой записи ряда Фурье для периодических функций (пределы интегрирования $-T/2$ и $+T/2$):

$$u(t)_{\text{пер}} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}$$

Так как в линейчатом спектре ряда Фурье расстояние между спектральными линиями соответствует

$$\Delta f = \Delta \omega / 2\pi = f_1 = 1/T$$

Можно также записать

$$u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\Delta \omega \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}$$

Далее выполняется предельный переход при $T \rightarrow \infty$ и $\Delta \omega \rightarrow 0$. При этом конечное расстояние между спектральными линиями $\Delta \omega$ за знаком суммы переходит в бесконечно малое расстояние $d\omega$, дискретная переменная $n\Delta \omega$ в непрерывную переменную ω , а сумма – в интеграл. Таким образом, получают интеграл Фурье для непериодической функции:

$$u(t)_{\text{непер.}} = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta \omega \rightarrow 0}} u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \underbrace{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt \right)}_{\dot{X}(\omega)} e^{j\omega t} d\omega$$

где $\dot{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt$ - представляет собой преобразование Фурье функции

$u(t)$ называемое спектральной плотностью $u(t)$; $|\dot{X}(\omega)|$ носит название плотности распределения амплитуд. Для непериодической функции $u(t)$ обратное преобразование Фурье имеет вид:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{X}(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Следовательно, преобразование Фурье и его обращение взаимобратны с точностью до множителя $1/2\pi$.

Название «спектральная плотность» происходит от того, что спектральная функция $\dot{X}(\omega)$ идентична линейчатому спектру $\dot{C}_n$, отнесенному к расстоянию между соседними частотами. Так как $T = 1/\Delta f = 2\pi/\Delta\omega$, получаем

$$\dot{C}_n = \Delta f \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-j\omega_n t} dt$$

Если отнести амплитуды $\dot{C}_n$ к Δf и образовать предельное значение для $T \rightarrow \infty$ (соответственно $\Delta f \rightarrow 0$), получим

$$\lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta f \rightarrow 0}} \frac{\dot{C}_n}{\Delta\omega} = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt = \dot{X}(\omega),$$

иначе говоря, спектральную плотность.

Если, например, линейчатый спектр $\dot{C}_n$ измеряется в вольтах, то спектральная плотность $\dot{X}(\omega)$ сравнимого однократного процесса имеет размерность В/Гц.

Очевидно, непериодические процессы тоже могут быть представлены как наложение синусоидальных или косинусоидальных колебаний. Однако в отличие от периодических процессов здесь участвуют все частоты от $-\infty$ до $+\infty$ с амплитудами $\dot{X}(\omega) d\omega$. Так как при однократных процессах содержащаяся в одном импульсе конечная энергия распределяется на бесконечное множество частот, то амплитуда отдельной спектральной составляющей должна быть бесконечно малой. Чтобы избежать этой неопределенности, относят энергию импульса к частоте и получают, таким образом, спектральную плотность, предельное значение которой при $\Delta f \rightarrow 0$ остается конечным и как раз соответствует преобразованию Фурье.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Какими параметрами характеризуется помеха в частотной области?
2. Опишите синусоидальную помеху во временной и частотной областях.
3. Опишите периодическую несинусоидальную функцию.
4. Представьте аналитически ряд Фурье любой функции времени в различных формах.
5. В каких случаях Ряд Фурье допускает представление в частотной области непериодических функций?
6. Определите спектр непериодической импульсной функции.

Список литературы:

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. Ф. Шаталов, И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 64 с. — 978-5-9596-1058-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47397.html>
2. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебник для вузов / А.Ф. Дьяков [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — М. : Издательский дом МЭИ, 2016. — 543 с. — 978-5-383-00973-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55879.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

Тема: Разряды статического электричества

Цель: изучить механизмы возникновения разрядов статического электричества

Знания и умения: знать воздействие разрядов статического электричества на электронные элементы и приборы

Актуальность темы: получение представлений о методах предотвращения вредного воздействия электростатических разрядов

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Под разрядами статического электричества понимают процессы выравнивания зарядов между отдельными телами, несущими разные электростатические заряды. Они обычно сопровождаются короткими и искровыми разрядными явлениями. При возникновении искр могут воспламениться горючие газы или пары, а вызванные разрядами токи и поля могут повредить электронный элемент, вывести из строя электронное оборудование или нарушить его работу. Первое названное воздействие относится к области пожаро- и взрывобезопасности, а последние – к области электромагнитной совместимости.

Заряды статического электричества могут возникать за счет индукции и трения.

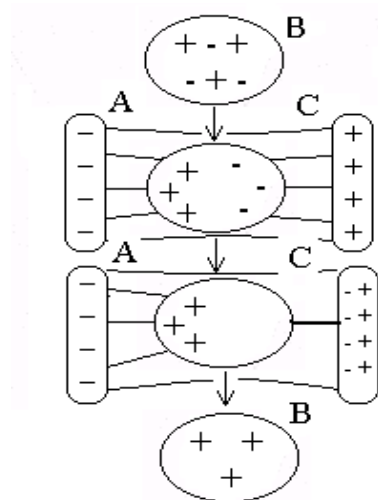


Рисунок . 1 Электризация за счет индукции

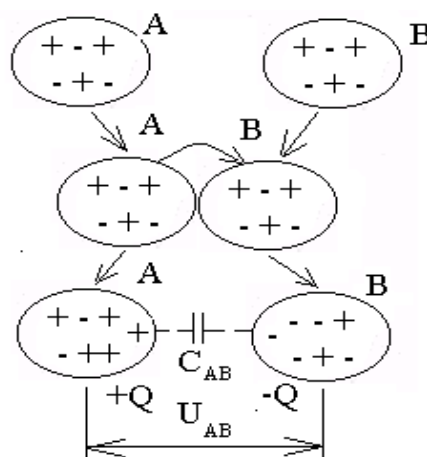


Рисунок 2. Электризация за счет трения

Рисунок 1 наглядно поясняет принцип электризации путем индукции. Пусть электрически нейтральное тело В попадает в электростатическое поле, образованное двумя заряженными телами А и С. При этом в теле В происходит поляризация зарядов. Если затем отвести отрицательные заряды тела В на тело С через проводник, то тело В останется заряженным положительно, даже если внешнее поле исчезнет.

Наиболее часто возникают электростатические заряды путем электризации тел трением (рисунок 2). Она возникает, если два различных, первоначально нейтральных тела А и В соприкасаются, трутся друг о друга, а затем разъединяются. Одно тело передает

электроны другому и заряжается положительно, а другое тело, получая электроны, заряжается отрицательно.

Токи в процессе заряда составляют от сотен пикоампер $100 \cdot 10^{-12}$ А до нескольких микроампер 10^{-6} А, а электрические заряды – от 3 нКл до 5 мКл. Разность потенциалов между телами определяется после окончания процесса разделения зарядов отношением приобретенного заряда Q к емкости C_{AB} тел между собой: $U_{AB}=Q/C_{AB}$. В связи с тем что величина емкости между заряженными телами очень мала (несколько пикофарад), напряжение между телами может достигать очень больших значений (до 10–20 кВ). Примеры электризации тел трением приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения напряжений, возникающих за счет трения
на различных телах

Причины возникновения	Напряжение, В
1. Человек, идущий по полу линолеума	200–9000
2. Извлечение микросхемы из пластикового пакета	до 20000
3. Извлечение микросхемы из пенопластовой тары	до 11000
4. Человек, идущий по нейлоновому ковру	10000–15000
5. Человек, работающий за верстаком	100–3000

На рисунке 3 приведена зависимость потенциала человека при ходьбе по полу при прохождении 6 м по полу с поливинилхлоридным (1) и резиновым (2) покрытием.

Значения напряжений, измеренные на одном из предприятий электронной промышленности при влажности воздуха 24 % и температуре 21 °С.

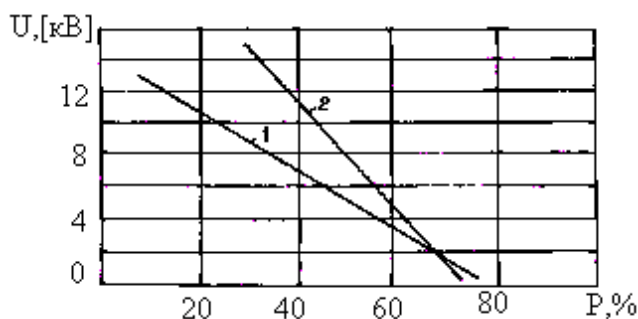


Рисунок 3 - Зависимость от влажности P потенциала человека при ходьбе по полу

С электронными деталями, микросхемами необходимо особенно осторожное обращение, чтобы избежать их повреждения из-за электростатических повреждений. Особое значение при обращении с микросхемами имеет электростатический заряд тела человека. Тело человека обладает емкостью относительно земли $C=100\text{--}300$ пФ. Если человек идет по полу с синтетическим покрытием, то эта емкость может зарядиться до $U_{\max}=15$ кВ и накопить энергию:

$$W=(C \cdot U_{\max}^2):2=(10\text{--}30) \text{ мДж}.$$

При приближении человека к заземленному корпусу электронного прибора произойдет искровой разряд. Каждый разряд статического электричества сопровождается электрическим и магнитным полями.

Основными методами предотвращения вредного воздействия электростатических разрядов являются предотвращение и ограничение накопления зарядов, отвод или нейтрализация паразитных зарядов, сведение к минимуму полевых и разрядных эффектов.

В таблице 2 приведены основные параметры электромагнитных импульсов различной природы.

Таблица 2

Параметры электромагнитных импульсов

Параметр	Молния на расстоянии от места удара, м		Разряд статического электричества на расстоянии от канала разряда, см		Коммутационные Процессы в электроэнергетических устройствах на расстоянии 10 м от устройства
	10	100	10	20	
Е, кВ/м	100–300	40	4	1	1–100
Н, А/м	1000–3000	160	15	4	до 300
Т _τ , нс	1000	1000	0,2	20	10–50
Частота спектра	1 кГц – 5 МГц		до 1 ГГц		1–100МГц
Область действия	Локальная, несколько километров		Точечная, несколько сантиметров		Локальная, десятки метров

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1.Поясните принцип электризации путем индукции.
- 2.Поясните электризацию тел трением.

Список литературы:

1. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебник для вузов / А.Ф. Дьяков [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — М. : Издательский дом МЭИ, 2016. — 543 с. — 978-5-383-00973-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55879.html>

2. Овсянников, А. Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебник / А. Г. Овсянников, Р. К. Борисов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 194 с. — 978-5-7782-2199-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47704.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

Тема: Уровни помех. Использование ЭМС-номограммы при описании помех

Цель: изучить количественную оценку электромагнитной совместимости с использованием логарифмических масштабов

Знания и умения: представлять импульсные помехи в частотной временной областях с использованием ЭМС - номограммы

Актуальность темы: научиться определять логарифмические относительные уровни помех

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

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

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

Для количественной оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) пользуются логарифмическими масштабами напряжений, токов, напряженностей электрического или магнитного поля, мощностей в относительных единицах, что позволяет наглядно представить соотношения величин, отличающихся на много порядков. Различают логарифм отношения уровня и степени передачи помехи. Уровни определяют отношение величины (например, напряжения U_x) к постоянному базовому значению (напряжения U_0), которое часто задается в единицах: $U_0 = 1$ мкВ и т.д..

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

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

а) напряжение:

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

б) ток:

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

в) напряженность электрического поля:

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

г) напряженность магнитного поля:

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

д) мощность:

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

Вышеуказанные уровни были определены с применением постоянной базовой величины и поэтому обобщенно называются абсолютными уровнями. Они характеризуют значения конкретных величин [1, 4, 5, 6]. Чтобы подчеркнуть, что величина является базо-

вой в ее обозначение, помимо дБ вводятся дополнительные индексы мкВ, мкА, например, дБмкВ, дБмкА и т.д.

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

$$1 \text{ Нп} = e = (U_x/U_0).$$

Между непером и децибелом существуют соотношения:

$$\frac{1}{2} \ln(U_x/U_0), \text{ Нп} = 201g(U_x/U_0), \text{ Дб},$$

или

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

Таким образом, применяя натуральный логарифм, можно принимая базовые значения определить аналогичным образом отношение величин в неперах ($1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ}$). В целом, в электромагнитной совместимости среди уровней помех различают *абсолютный* и *относительный* уровни. **Абсолютный уровень** определяется для ряда значений: *уровень помех, пороговое значение помехи, уровень полезного сигнала*, отнесенных к определенной базовой величине (например, мкВ).

Пример соотношений уровней полезного сигнала и помехи в зависимости от частоты приведен на рисунке 1. Уровнем помех называют относительное значение помехи (рисунок 1), при этом предел ее допустимых уровней определяют в стандартах DIN/VDE, ГОСТ, ОСТ.

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

Уровень полезного сигнала – относительное 100% значение полезного сигнала.

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

Интервалом помехи называют разность между уровнями полезного сигнала и порогового значения помехи (рисунок 1), исчисляемый так же, как логарифм отношения значения полезного сигнала и порогового значения помехи.

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

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

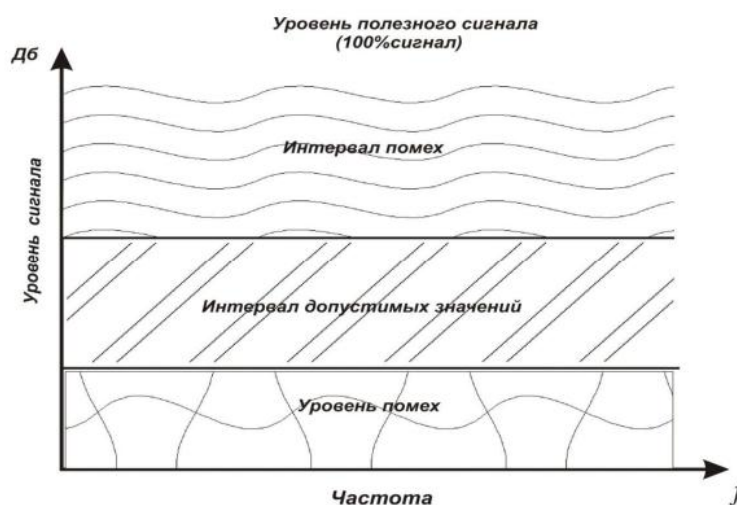


Рисунок 1 – Уровни и интервалы помех

ЭМС – номограмма

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

Поскольку передаточные свойства путей связи и средств помехоподавления удобно представлять в частотной области, то для перехода из временной в частотную используют преобразования Фурье. Для быстрой практической (и соответственно, графической) реализации преобразования Фурье используют ЭМС – номограмму (номограмма электромагнитной совместимости).

ЭМС – номограмма служит для:

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

Рассмотрим трапециевидный импульс (рисунок 2). Используя преобразования Фурье плотность распределения амплитуд (рисунок 2) определяется выражением:

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

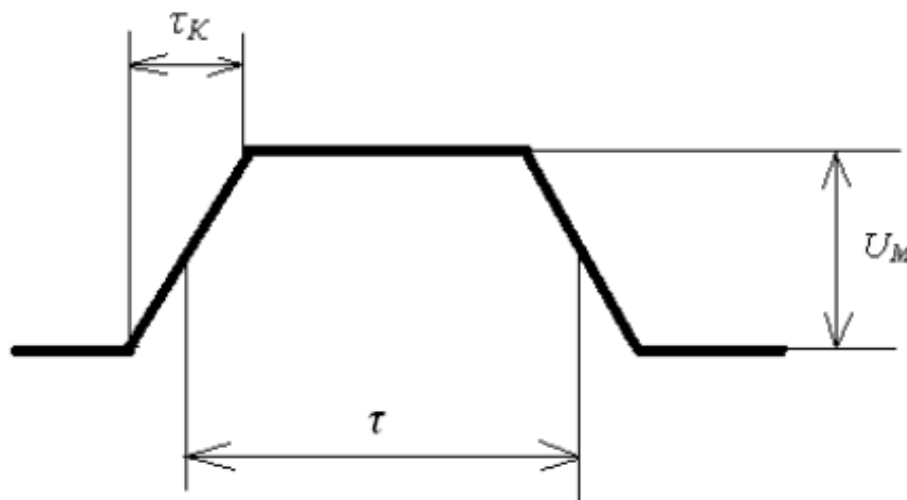


Рисунок 2- Трапециевидный импульс

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

ЭМС - номограмма базируется на аппроксимации огибающей плотности распределения амплитудной плотности тремя отрезками прямой (рисунок 3).

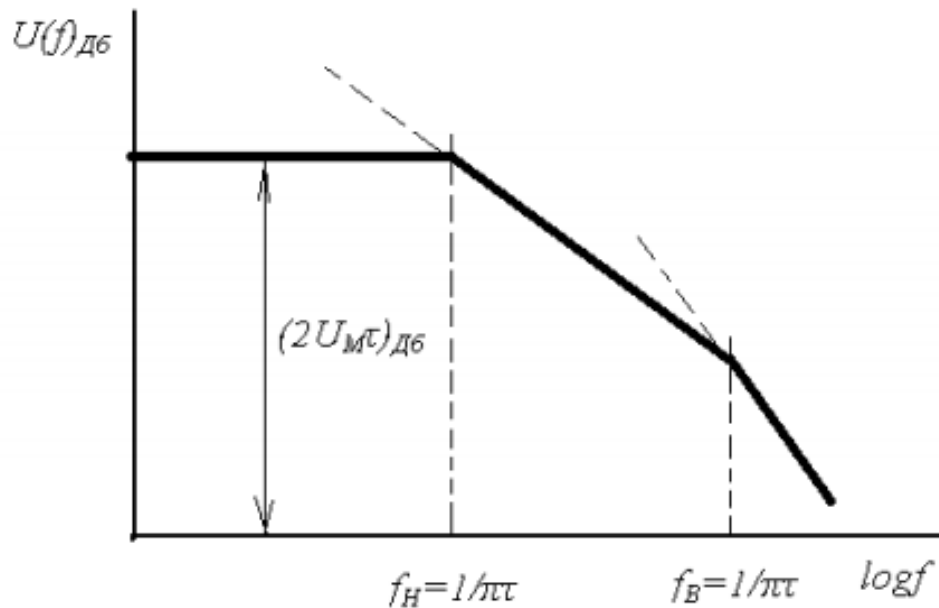


Рисунок 3 – Огибающая «физической» плотности распределения амплитуд трапециевидного импульса (линейная аппроксимация):

f_H – нижняя; f_B – верхняя сопрягающая частоты

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

$$U(f) = 2m\tau = \text{const}.$$

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

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

где $A_0 = 1$ мкВ·с

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

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

где $A_0 = 1$ мкВ·с

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

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

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

$$u(f)_{\text{дБ}} = 20 \lg \frac{2U_m}{\pi f A_0}.$$

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

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

или

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

то есть 40 дБ/декаду.

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

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

Плотность распределения амплитуд импульса определяется:

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

Крутизну фронта нарастания импульса можно определить по выражению:

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

Длительность импульса определится из соотношения:

$$\tau = 1 / \pi f_H.$$

Время нарастания импульса:

$$\tau_k = 1 / \pi f_B.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

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

Список литературы:

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. Ф. Шаталов, И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 64 с. — 978-5-9596-1058-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47397.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

Тема: Помехозащитные устройства. Экранирование

Цель: дать понятие электромагнитных экранов и принципа их действия

Знания и умения: выбор технических средств защиты от помех, применяемых в различных электроэнергетических системах для обеспечения помехоустойчивости;

Актуальность темы: получение представлений о применении экранов для обеспечения помехоустойчивости

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Экранирование электромагнитных полей является актуальной задачей информационной безопасности, защиты здоровья, электромагнитной совместимости, электромагнитной экологии. Одним из путей проникновения электромагнитных помех во вторичные цепи является наличие ёмкостной или индуктивной связей между цепями. Ослабление связи достигается экранированием электромагнитных полей. Для ослабления электрического поля обычно используются конструкции из высокопроводящих материалов. Ослабление магнитного поля производят с помощью экранов из ферромагнитных материалов. Высокочастотные поля экранируют ферромагнитными материалами, либо высокопроводящими немагнитными материалами.

Как правило, такие материалы являются достаточно дорогими, поэтому экранирование помещений является дорогостоящим решением. В последнее время появились композиционные материалы, которые могут быть эффективным и достаточно дешевым решением.

Экранирование служит для ослабления электрических, магнитных и электромагнитных полей, а именно для того, чтобы исключить проникновение и воздействие таких полей на элементы, блоки, приборы, кабели, помещения и здания, а также для того, чтобы подавить исходящие из электрических и электронных промышленных средств и устройств помехи, обусловленные полями. Экран устанавливается между источником и приёмником помех и снижает напряжённости электрического и магнитного полей воздействующего поля за экраном. Физически экранирование объясняется наведением на поверхности экрана заряда или индуктированием в нём тока, поле которого накладывается на воздействующее, ослабляя его. Тем самым как бы удаляется чувствительный приёмник помехи от источника.

На эффективность экранирования оказывают существенное влияние частота поля, электропроводность и магнитная проницаемость материала экрана, конфигурация и размеры экрана.

Экранирование осуществляется также частично поглощением энергии поля материалом экрана, а частично – отражением падающей волны. Принципиально следует иметь в виду, что эффективность экранирования зависит от наличия дефектов и отверстий в стенке экрана (трещин, дверных, вентиляционных и оконных проёмов, кабельных вводов и отверстий для элементов обслуживания и сигнализации), а также то, что внутри экранированных объёмов могут возникать резонансные эффекты, так как любой корпус

прибора с проводящими стенками можно рассматривать как объёмный резонатор. Для экранирования используют как немагнитные металлы, чаще всего медь, так и ферромагнитные материалы. Экранирующее действие известных немагнитных материалов ($\mu_r = 1$, $\epsilon_r = 0,6 - 1$) происходит из-за магнитных полей, созданных вихревыми токами. При этом постоянное магнитное поле совсем не экранируется, а низкочастотное переменное ослабляется незначительно. Напротив, электрические поля такими экранами демпфируются очень хорошо. Экраны из ферромагнитных материалов ($\mu_r \gg 1$, $\epsilon_r < 1$) ослабляют электрические поля в области низких частот хуже, чем экраны из немагнитных, однако, в отличие от последних, они вызывают определенное ослабление постоянных магнитных полей. С повышением частоты демпфирующее действие в отношении и электрических, и магнитных полей возрастает. Имеются различные экранирующие материалы и устройства, поставляемые в различных формах, в зависимости от решаемых задач. Это: – прикрепляемые болтами пластины и привариваемые тонкие стальные и медные листы для изготовления экранированных корпусов и для покрытия стен помещений;

- тонкая легкоразрезаемая и деформируемая фольга из мягко-магнитных сплавов с высокой магнитной проницаемостью для изготовления образцов и серийных приборов;
- металлические ленты и оплетки для кабелей;
- металлические плетёные шланги для дополнительного экранирования кабелей и кабельных жгутов;
- металлические сотовые структуры для воздухопроницаемых экранирующих элементов (например, для экранированных кабин);
- металлические сетки, проводящая прозрачная фольга и стекла с запыленным металлом для окон при комплексном высокочастотном экранировании;
- наносимые на пластмассовые корпуса распылением серебряные, никелевые или медные покрытия;
- пластмассовые комбинированные материалы с проводящими добавками (металлическим порошком, нитями, например, из углерода и т.п.) для изготовления экранированных корпусов.

Здания, массивные строительные сооружения без особых мер защиты ослабляют внешние поля на 6–10 дБ, железобетонные со сваренной стальной арматурой – до 25–30 дБ.

Для обеспечения экранирующих свойств корпусов, кабин и помещений часто неизбежные вводы, щели, стыки стен, дверные проемы и другие элементы, прозрачные для высокочастотного излучения, уплотняются. Соответствующие уплотнения должны гарантировать непрерывность вихревых токов, индуктированных полем. Поэтому они должны быть изготовлены из хорошо проводящих и механически формируемых материалов, достаточно устойчивых к функционально обусловленным воздействиям и окружающим условиям, обладать по возможности малым контактным сопротивлением с соприкасающимися металлическими конструктивными элементами.

Находят применение и другие уплотняющие материалы и изделия:

- эластомеры с добавками, обеспечивающими достаточную электропроводность, на основе силанового каучука в виде пластин, кольцевых шнуров, трубок. В качестве напол-

нителers используют углерод, никелевые или серебряные частицы, посеребренный медный, никелевый или стеклянный порошок, посеребренную алюминиевую пудру;

- полностью металлические плетеные изделия в форме чулка, круглых или прямоугольных прокладок, двойных прокладок с эластомерным сердечником или без него для уплотнения, например, прикрепляемых болтами крышек, стенок корпуса;

- проволочные оплетки, пропитанные эластомером, например, для уплотнений электрических соединений;

- пластины из силиконового каучука, содержащие перпендикулярно расположенные к поверхности металлические нити;

- пружинящие устройства из бериллиевой бронзы для уплотнения дверей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите материалы для изготовления экранов.
2. Какие факторы влияют на эффективность экранирования?

Список литературы:

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. Ф. Шаталов, И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 64 с. — 978-5-9596-1058-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47397.html>

2. Овсянников, А. Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебник / А. Г. Овсянников, Р. К. Борисов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 194 с. — 978-5-7782-2199-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47704.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

Тема: Помехозащитные устройства. Фильтры

Цель: дать понятия фильтров и принципа их действия

Знания и умения: с помощью технической документации и литературы разбираться в работе систем фильтрации сигналов, применяемых в различных электроэнергетических системах для обеспечения помехоустойчивости и рассчитывать параметры фильтров

Актуальность темы: овладение навыками выбора схемы и технических средств защиты от помех

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Помехоподавляющие фильтры представляют собой элементы для обеспечения затухания поступающей по проводам помехи. Целесообразное их применение предполагает, что спектральные составляющие полезного сигнала и помехи достаточно отличаются друг от друга. Это позволяет при соответствующих параметрах фильтра обеспечить селективное демпфирование помехи при отсутствии заметного искажения полезного сигнала. При этом эффект демпфирования достигается делением напряжения. Поясним это на простейшем примере.

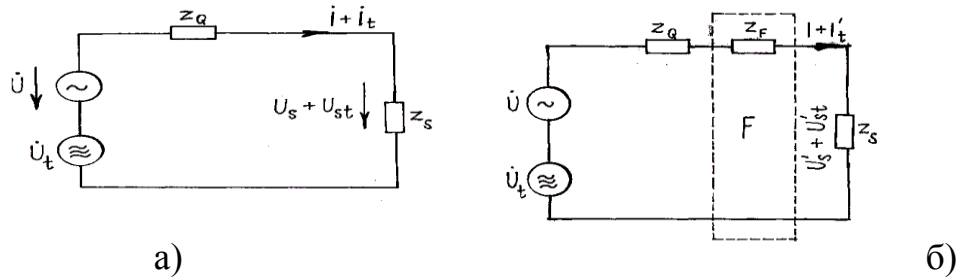


Рисунок 1 - Цепь без фильтра (а) и с фильтром F (б)

Если в низкочастотный контур полезного сигнала (полезный сигнал U , I , рисунке 1, а) поступает высокочастотное напряжение помехи U_t , то на полном сопротивлении приемника Z_s появляется составляющая напряжения помехи

$$\overline{U_{st}} = \overline{U_t} \cdot \frac{Z_s}{Z_s + Z_Q}.$$

Введение зависящего от частоты продольного полного сопротивления $Z_F (\omega L)$ (рисунок 1, б), представляющего для низкочастотного тока I очень малое сопротивление, а для высокочастотного тока I_t – очень большое сопротивление, обеспечивает ослабление помехи, а составляющая напряжения помехи снижается до уровня

$$\overline{U'_{st}} = \overline{U_t} \cdot \frac{Z_s}{Z_s + Z_F + Z_Q}.$$

Достижимый эффект затухания можно характеризовать коэффициентом затухания – отношением падений напряжений на Z_s при наличии Z_F и без него:

$$\left| \frac{\overline{U_{st}}}{\overline{U'_{st}}} \right| = \left| \frac{Z_s + Z_F + Z_Q}{Z_s} \right|.$$

Коэффициент затухания приводится, как правило, в виде логарифма отношения напряжений и выражается в децибелах:

$$K_e = 20 \cdot \lg \left| \frac{\overline{U_{st}}}{\overline{U'_{st}}} \right|.$$

Согласно этому выражению, эффект затухания зависит не только от сопротивления Z_F , но и от полных сопротивлений Z_Q и Z_s .

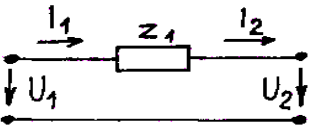
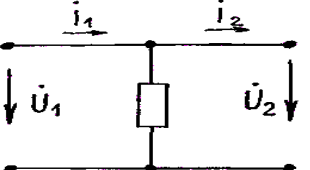
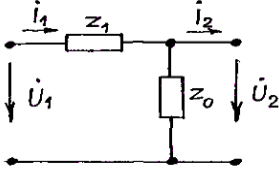
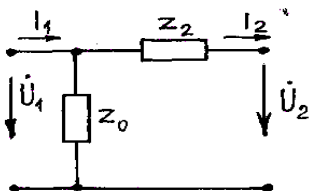
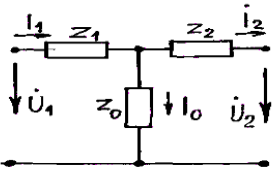
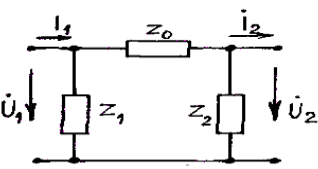
В общем случае фильтр F любой структуры представляет собой четырехполюсник, объединяющий источник помехи и приемник. Для расчета фильтров используют известные соотношения для четырехполюсника:

$$\begin{aligned} \overline{U_1} &= A_{11} \cdot \overline{U_2} + A_{12} \cdot \overline{I_2}, \\ \overline{I_1} &= A_{21} \cdot \overline{U_2} + A_{22} \cdot \overline{I_2}, \end{aligned}$$

где A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} – коэффициенты четырехполюсника. Их конкретные значения для простейших структур фильтров приведены ниже.

Таблица1

Параметры четырехполюсников простейших схем фильтров

Схема	Коэффициент			
	A_{11}	A_{12}	A_{21}	A_{22}
	1	Z_1	0	1
	1	0	$1/Z_0$	1
	$1+Z_1/Z_0$	Z_1	$1/Z_0$	1
	1	Z_2	$1/Z_0$	$1+Z_2/Z_0$
	$1+Z_1/Z_0$	$Z_1+(Z_1Z_2/Z_0)$	$1/Z_0$	$1+Z_2/Z_0$
	$1+Z_0/Z_2$	Z_0	$1/Z_1+1/Z_2+Z_0/Z_1Z_2$	$1+Z_0/Z_1$

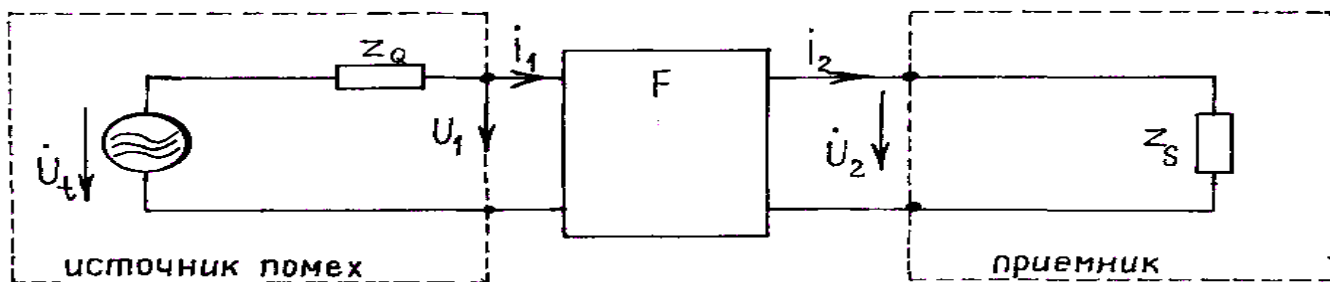


Рисунок 2 - Токовый контур с фильтром

Для схемы, представленной на рисунке 2, можно записать:

$$\overline{U}_t = \overline{U}_1 + Z_Q \cdot \overline{I}_1,$$

$$\overline{U}_2 = Z_S \cdot \overline{I}_2.$$

Поэтому коэффициент затухания в фильтре любой структуры в соответствии с формулами данными можно выразить следующим образом:

$$K_e = 20 \cdot \lg \left| \frac{Z_s}{Z_Q + Z_s} \cdot A_{11} + \frac{1}{Z_Q + Z_s} \cdot A_{12} + \frac{Z_Q \cdot Z_s}{Z_Q + Z_s} \cdot A_{21} + \frac{Z_Q}{Z_Q + Z_s} \cdot A_{22} \right|.$$

Отсюда следует, что коэффициент затухания зависит, с одной стороны, от параметров фильтра A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} , а с другой стороны – от полных сопротивлений источника и приемника помех. Коэффициент затухания в зависимости от конкретных условий может иметь сильно различающиеся значения для одного и того же фильтра. Поэтому практически невозможно задать общую характеристику фильтра независимо от конкретных условий, и приводимые в справочниках значения коэффициента затухания фильтров относятся всегда к особому случаю системного согласования $Z_Q = Z_S$ и к средним значениям Z_Q и Z_S , например, 50, 60, 150 или 600 Ом.

Если значения Z_Q и Z_S известны приблизительно, то выбор подходящей фильтровой структуры может производиться по следующим рекомендациям (таблицы 2).

Таблица 2

Рекомендации по выбору структуры фильтра

Сопротивление источника	Схема	Сопротивление приемника
Мало		Мало

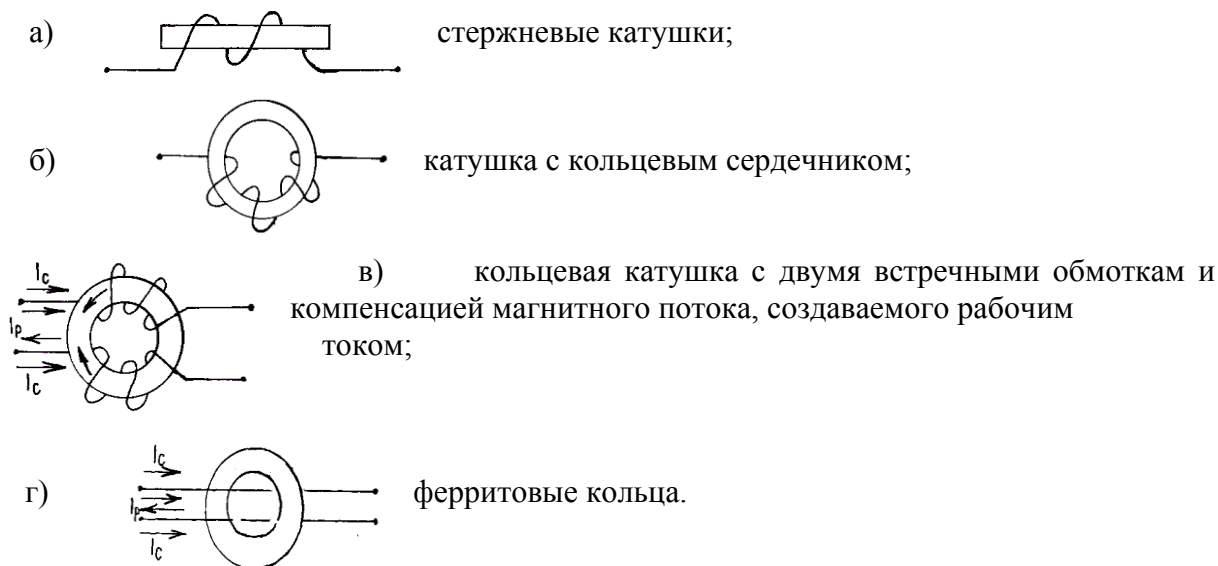
Велико		Велико
Велико		Мало
Мало, неизвестно		Мало, неизвестно
Велико, неизвестно		Велико, неизвестно

Основными составными элементами фильтров являются катушки индуктивности и конденсаторы. Они могут использоваться для подавления помех отдельно или в комбинации друг с другом. Фильтровые элементы представляют собой, в зависимости от номинального напряжения и пропускной способности по току, приборы для монтажа в помещениях, встраиваемые в шкафы, разъемы или чип-элементы для монтажа на печатных платах.

Изготавливаются следующие виды помехозащитных конденсаторов:

- а) конденсатор с двумя выводами;
- б) конденсатор с тремя выводами;
- в) конденсатор-четырёхполюсник;
- г) многоэлементный конденсатор;

Помехозащитные катушки с рабочим током I_p , и синфазным током помехи I_c ;



Двухполюсные конденсаторы в зависимости от соединения их в токовую цепь пригодны для защиты как от синфазных, так и от противофазных помех. Конденсаторы-четыреполюсники защищают от противофазных помех, а многосекционные конденсаторы – как от противофазных, так и синфазных помех.

Помехозащитные катушки индуктивности представляют собой катушки с малым активным сопротивлением и малой паразитной емкостью.

Они имеют замкнутые или разомкнутые сердечники. Катушки индуктивности со стержневыми или с кольцевыми сердечниками демпфируют как синфазные, так и противофазные сигналы.

Так как в катушках индуктивности с сердечниками магнитная цепь не замкнута, то их магнитная проницаемость и индуктивность практически не зависят от тока.

Сетевые помехоподавляющие фильтры представляют собой фильтры низких частот, свободно пропускающие напряжения сети и подавляющие высокочастотные помехи. Их применение преследует две цели: во-первых, защиту устройства от помех, поступающих от сети питания, и, во-вторых, снижение уровня помех, исходящих от прибора по проводам питания.

Продольный элемент фильтра выбирают с учетом потребляемого из сети тока. Хотя обычно значение полного сопротивления источника и приемника помех неизвестно, часто можно принять сопротивление со стороны сети малым, а со стороны нагрузки – большим.

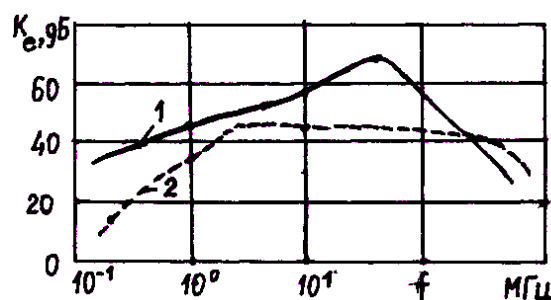
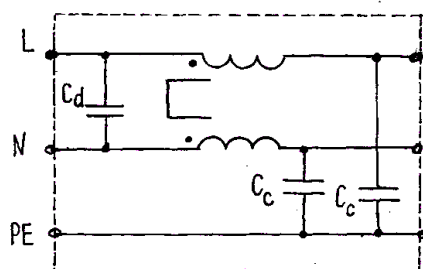


Рисунок 4 - Пример сетевого фильтра на 220 В, ток 1 А, а) схема, б) частотные зависимости: 1 – противофазные помехи, 2 – синфазные помехи

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие схемы фильтров вам известны.
2. Назовите рекомендации по выбору структуры фильтра.
3. Как выбирают продольный элемент сетевого фильтра.

Список литературы:

1. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. Ф. Шаталов, И. Н. Воротников, М. А. Мастепаненко [и др.]. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2014. — 64 с. — 978-5-9596-1058-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47397.html>
2. Овсянников, А. Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебник / А. Г. Овсянников, Р. К. Борисов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 194 с. — 978-5-7782-2199-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47704.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7

Тема: Электромагнитная обстановка на энергетических и промышленных объектах

Цель: изучить основные виды помех на объектах электроэнергетики

Знания и умения: уметь правильно компоновать оборудование, здания и помещения на энергометевом объекте

Актуальность темы: знать пути достижения необходимого уровня электромагнитной совместимости оборудования на энергообъектах

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Надёжность работы энергетических и промышленных объектов во многом определяется надёжностью работы электронной (сейчас, как правило, цифровой) аппаратуры защиты, автоматики, связи и т.п. Специфика современных объектов такова, что устанавливаемая на них электронная аппаратура часто подвергается воздействию высоких уровней электромагнитных помех. Рассмотрим особенности ЭМО на энергообъектах, на примере подстанции (рисунки 1)

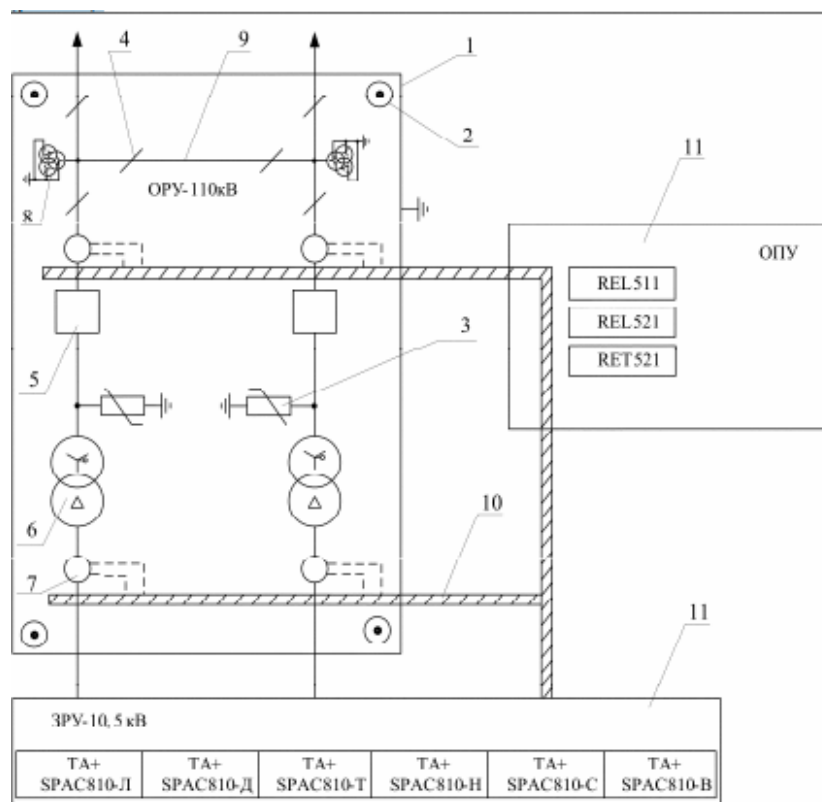


Рисунок 1 - Принципиальная схема расположения терминалов защиты

- 1 – контур заземления; 2 – молниеотвод; 3 – ОПН; 4 – разъединитель;
 5 – выключатель; 6 – трансформатор; 7 – трансформатор тока;
 8 – трансформатор напряжения; 9 – шина; 10 – кабельный лоток;
 11 – общестанционный пункт управления

Оценка ЭМО на энергетических объектах регламентируется методическими указаниями по определению электромагнитной обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях СО 34.35.311-2004. Методические указания предназначены для решения актуальной комплексной задачи: определения наиболее неблагоприятной ЭМО, характеризуемой наибольшими, но реально возможными ЭМП в местах расположения микропроцессорных устройств; проверки ЭМС на действующих объектах; разработки требований по классам жёсткости испытаний на помехоустойчивость. В указаниях приведены методики измерений и расчётов уровней ЭМП, вызванных различными причинами, например, оценка импульсных помех при коммутациях силового оборудования и коротких замыканиях. Приводятся рабочие программы испытаний, протоколы, классификация ЭМО, классы и степени жёсткости испытаний устройств на помехоустойчивость, требования к техническим средствам воздействий и измерений.

Основной вклад в ЭМО на энергетических объектах, как правило, вносят следующие виды помех:

1. Короткие замыкания (КЗ)

Протекание по заземляющему устройству (ЗУ) значительных токов КЗ в сетях высокого напряжения приводит к возникновению:

а) перепадов потенциалов в пределах ЗУ. Таким образом, значительные разности потенциалов оказываются приложенными к вторичным кабелям (как проходящим в пределах ЗУ объекта, так и выходящим за его пределы) и соответствующим входам аппаратуры;

б) кроме того, протекание токов КЗ в силовых ошиновках и по элементам ЗУ со-

здаёт магнитное поле, амплитуда которого часто составляет сотни А/м. Это поле создаёт наводки на вторичные кабели в случае их сближения с трассой протекания тока КЗ.

В реальности оба эти фактора часто действуют одновременно, вызывая значительные перенапряжения, опасные для аппаратуры и даже изоляции кабелей.

2. Грозовые разряды

Растекание тока молнии часто происходит по элементам систем заземления и питания информационной техники либо вблизи от неё.

Пример: При расследовании причин повреждения аппаратуры в одном из диспетчерских управлений, было установлено, что причина отказа элементов систем связи, АСУ и сигнализации, явилось непосредственное воздействие импульсного электромагнитного поля на аппаратуру. По приближённой оценке, напряжённость магнитного поля в месте размещения аппаратуры составила от 300 до 1000 А/м, что может представлять угрозу даже для специальной аппаратуры в промышленном исполнении, не говоря уже о компьютерах и АТС офисного типа.

Особую опасность представляют разряды на мачты радиосвязи, расположенные рядом с ОПУ, приводящие к подъёму потенциала заземления здания, кабельных каналов и лотков, к протеканию части тока молнии по экранам ВЧ- кабелей и металлоконструкциям в здании, к наводкам на вторичные кабели, к действию электромагнитного поля на аппаратуру, к проникновению импульса в систему питания через цепи питания устройств на мачте.

На ТЭЦ и ГРЭС опасность могут представлять молниевые разряды на трубы. При разряде на стержневые и тросовые молниеприёмники возможно попадание заземления аппаратуры, измерительных трансформаторов, а также трасс прокладки вторичных цепей в зону подъёма потенциала вблизи заземления молниеприёмника. В этом случае недопустимо высокая разность потенциалов может быть приложена к изоляции вторичных цепей и входам аппаратуры. Возможно распространение помех по сети собственных нужд при разряде на молниеприёмники прожекторных мачт.

3. Переходные режимы работы высоковольтного оборудования (в том числе, вызванные коммутациями)

При коммутационных операциях выключателями и разъединителями в сети высокого напряжения возникает высокочастотный переходный процесс. Параметры этого процесса индивидуальны для каждого объекта и, более того, даже для каждой конкретной коммутации. Высокочастотные токи и перенапряжения через системы шин распространяются по территории объекта. Они создают электромагнитные поля, способные вызвать наводки во вторичных кабелях и даже во внутренних цепях аппаратуры. Кроме того, проникновение коммутационных помех во вторичные кабели происходит через трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, фильтры присоединения высокочастотной связи. Особенно серьёзна ситуация на компактных элегазовых подстанциях, где высоковольтное оборудование и подверженная его влиянию электронная аппаратура размещаются очень близко друг к другу. Следует отметить, что уровни коммутационных помех зависят от множества факторов, среди которых наиболее существенные: геометрия объекта, тип первичного оборудования, состояние заземляющего устройства, трассы прокладки вторичных цепей.

Истинный уровень коммутационных помех может быть достоверно определён лишь по результатам измерений. Поэтому измерение коммутационных помех следует рассматривать как обязательную часть комплекса оценки ЭМО.

4. Неправильная компоновка подстанции

Иногда информационные цепи и электронная аппаратура располагаются рядом с силовым электрооборудованием, включая контакторы, мощные реле. Это может привести к проблемам ЭМС, особенно при коммутациях силовых цепей. Помехи при коммутациях

высоковольтного оборудования могут приводить к проникновению помех во вторичные цепи трансформаторов тока, трансформаторов напряжения; к наводкам на любые вторичные цепи, в том числе питания, связи; к появлению импульсных потенциалов и токов в элементах заземляющего устройства. При работе коммутационных аппаратов генерируются высокочастотные токи и перенапряжения в первичной сети. Причиной их возникновения являются высокочастотные переходные процессы, протекающие в коммутируемых шинах. Аналогичная ситуация наблюдается

при КЗ (поскольку наряду с низкочастотной составляющей ток КЗ имеет высокочастотную импульсную составляющую). Любой элемент первичной сети обладает распределённой или сосредоточенной ёмкостью и индуктивностью. Таким образом, образуется колебательный контур, в котором при переключениях возбуждаются высокочастотные колебания. Через различные механизмы связи (гальванический, индуктивный, ёмкостной) эти помехи попадают во вторичные цепи и затем - на входы аппаратуры. Иногда (особенно при коммутациях разъединителями) воздействие помех носит многократный характер. Причиной этого является многократный пробой воздушного промежутка за время работы коммутационного аппарата. Опасные помехи могут возникать и при коммутациях в сетях до 1 кВ. Типичная ситуация - разрыв тока в индуктивной нагрузке (например, на обмотке контактора). Механизм генерации помехи амплитудой до нескольких кВ полностью аналогичен принципу работы системы зажигания двигателя внутреннего сгорания.

При разрыве тока, протекающего через обмотку, в силу закона электромагнитной индукции, возникают перенапряжения. Теоретически, при мгновенном прекращении протекания тока, перенапряжение будет бесконечно большим. В реальности, перенапряжение лимитируется электрической прочностью воздушного промежутка коммутационного аппарата. Ёмкости (паразитные или специально включенные) также могут снизить амплитуду помех.

5. Внутренние источники помех в помещениях

Коммутации электромеханических устройств различного назначения. Осциллографирование помех при коммутациях низковольтных цепей показало, что переключения реле, электроприводов и т.п. также сопровождаются коммутационными помехами. Частоты обычно оказываются значительно выше, чем при коммутациях высоковольтного оборудования (до сотни МГц и даже выше).

Штатная работа силового электрооборудования (до и выше 1 кВ).

Низкочастотные магнитные поля при нормальной работе силового электрооборудования. При компактном расположении силового и электронного оборудования возможно постоянное воздействие на аппаратуру полей высокого уровня. Кроме того, часто приходится сталкиваться с повышением уровня магнитного поля промышленной частоты, обусловленным ошибочной конструкцией системы собственных нужд объекта. Амплитуда таких полей обычно слишком мала для того, чтобы вызывать сбои или отказы оборудования. Однако, часто приходится сталкиваться с их негативным влиянием на дисплеи («дрожание» изображения). Это приводит к быстрой утомляемости оперативного персонала, имеющего автоматизированные рабочие места. Кроме того, оказываются превышенными нормы Санитарных правил.

6. Радиосредства

За последнее десятилетие были отмечены случаи сбоев в работе электронной аппаратуры на энергообъектах под действием полей радиочастотных источников.

В некоторых случаях фиксируется неблагоприятное воздействие на аппаратуру радиочастотных электромагнитных полей. Напряжённость поля, создаваемого любыми радиосредствами, быстро падает по мере удаления от передающей антенны. Поэтому поле от портативной радиации, работающей рядом с аппаратурой, может оказаться более опасным,

чем поле от мощного радицентра, размещённого на расстоянии нескольких сот метров от объекта. Антенны радиорелейной и космической связи обычно являются направленными, и при правильной установке опасности аппаратуры не создают.

7. Низкое качество напряжения питания

Низкое качество напряжения питания в цепях переменного и постоянного тока может иметь различные причины. Наиболее распространенные: недостаточная мощность источника питания, существенно нелинейный характер нагрузки (например, блоки питания электронной аппаратуры); кратковременные скачки потребляемой мощности (например, при работе электроприводов выключателей).

Чаще всего проблемы качества питания возникают на подстанциях, питающих мощную нелинейную нагрузку. Таковы, в частности, тяговые подстанции, подстанции многих промышленных предприятий. Другим распространённым источником проблем с качеством питания является использование устаревших источников бесперебойного питания, инверторов, стабилизаторов.

8. Электростатические потенциалы

Электростатический разряд представляет опасность для современной аппаратуры из-за высокочастотного характера импульса (фронт - менее 1 нс). Хотя энергия, переносимая таким импульсом, мала, за счёт высокой амплитуды недопустимое влияние на аппаратуру (в первую очередь, логические элементы) оказывается возможным.

9. Штатные режимы работы электроустановок, допускающие протекание значительных токов через ЗУ объекта

В большинстве случаев протекание значительных токов по заземляющему устройству объекта не является штатной ситуацией, тем не менее, иногда это всё же происходит. В этом случае на заземляющем устройстве объекта постоянно присутствует некоторый потенциал. Этот потенциал может вызывать появление помех, в частности - в цепях связи с другими объектами. При больших размерах объекта или плохом состоянии его заземляющего устройства, значительные разности потенциалов могут появиться и в пределах территории объекта. Плохое заземление на подстанциях создаёт не только высокие остаточные напряжения, но и даже достаточно большое шаговое напряжение.

10. Перенапряжения в сетях с изолированной нейтралью

Сети 6-35 кВ работают с изолированной нейтралью либо с компенсацией ёмкостного тока замыкания на землю. Дугогасящие аппараты для компенсации ёмкостного тока замыкания на землю устанавливаются, если его величина превышает определённые нормированные значения: 30 А для сети 6 кВ. 20 А для сети 10 кВ и 10 А для сети 35 кВ.

Сети с изолированной или компенсированной нейтралью могут длительно работать с однофазным замыканием на землю (033). Из-за старения оборудования существенно снижается уровень изоляции. Тогда наличие 033 в сети увеличивает риск многофазных повреждений.

В сетях 6-35 кВ внутренние перенапряжения возникают при: включении и отключении воздушных и кабельных линий; отключении ненагруженных трансформаторов; отключении двойного КЗ на землю; отключении двухфазных КЗ; одновременном включении фаз при пуске электродвигателей; включении электродвигателей при автоматическом вводе резерва (АВР); или автоматическом повторном включении (АПВ); отключении электродвигателей; коммутации нагрузки вакуумными выключателями; дуговых замыканиях на землю; резонансных повышении напряжения.

Необходимого уровня ЭМС электрооборудования сетей 6-35 кВ можно достичь:

1) применением нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН), обеспечивающих защиту от грозовых и коммутационных перенапряжений;

2) увеличением электрической прочности изоляции воздушных линий путём замены неизолированных проводов на защищённые, применения полимерных изоляторов из

кремнийорганической резины или увеличения числа изоляторов в гирлянде;

- 3) уменьшением сопротивления заземления;
- 4) повышением надёжности и селективности действия защиты от 033;
- 5) повышением кратности действия автоматического повторного включения (АПВ) на воздушных линиях.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите особенности ЭМО на подстанции.
2. Перечислите и охарактеризуйте основные виды помех на энергетических объектах
3. Назовите меры обеспечения допустимого уровня ЭМС электрооборудования сетей

Список литературы:

Овсянников, А. Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебник / А. Г. Овсянников, Р. К. Борисов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 194 с. — 978-5-7782-2199-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47704.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8

Тема: Нормирование условий работы персонала и проживания людей в зоне влияния ПС и ВЛ СВН

Цель: изучить влияние электрических и магнитных полей на человека

Знания и умения: знать нормы допустимых напряженностей электрического и магнитного полей для персонала и населения;

Актуальность темы: иметь представление о нормах безопасных для здоровья людей напряженностей электрического и магнитного полей на объектах электроэнергетики

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Нормирование напряженностей полей

Во многих странах, включая Россию, идет процесс совершенствования нормирования безопасных для здоровья людей напряженностей электрического и магнитного полей, а также потока мощности высокочастотных полей.

Обоснование норм в последние годы становится все более актуальным. При этом все отчетливее проявляются две тенденции: стремление установить более жесткие нормы, закладывая в них большие коэффициенты запаса и возможности проявления пока научно не установленных механизмов влияния

на здоровье, например слабых, но длительно действующих полей промышленной частоты, и стремление оценить реальную опасность полей для здоровья человека и на этой базе пересмотреть существующие и обосновать новые нормы по допустимым напряженностям полей и ограничениям пребывания человека в них.

Проявление этих тенденций тесно связано с экономическими аспектами, так как соблюдение санитарных и строительных норм по допустимым напряженностям полей, обеспечение нормированных зон отчуждения для линий электропередачи высокого напряжения и т.д. сопряжено с большими затратами или экономическими потерями.

Следует заметить, что процесс пересмотра норм по воздействию электрических, магнитных и электромагнитных полей на человека в настоящее время является чрезвычайно динамичным. Нормативные документы за рубежом часто пересматриваются и изменяются, становится иным их правовой статус.

В настоящее время в основу нормирования допустимых напряженностей магнитных и электрических полей положены научно установленные механизмы влияния на организм человека: изменение разности потенциалов на мембранах клеток при частотах ниже 10 кГц и нагрев тканей при более высоких частотах. Соответственно базовыми величинами являются безопасные плотность тока в тканях организма в диапазоне частот 4 - 1000 Гц 10 мА/м^2 , а при частотах выше 10 кГц - удельная энергия 4 Вт/кг. При частоте 50 Гц указанной плотности тока соответствуют напряженности внешних полей 20 кВ/м и 4 кА/м.

При нормировании допустимой напряженности полей и времени их воздействия на рабочих местах и для населения в настоящее время вводят коэффициенты запаса. Так, при тепловом воздействии высокочастотных полей нормы устанавливаются по удельной энергии, в 10 раз меньшей безопасной, т. е. по энергии 0,4 Вт/кг. При низких частотах также устанавливаются коэффициенты запаса от 2,5 до 10 и выше. В нашей стране гигиенические нормы внутри зданий составляют 0,5 кВ/м, напряженность электрического поля на границе отчуждения линий электропередачи не должна превышать 1 кВ/м. Близки к этим значениям и нормы других стран. В США, например, нормированы напряженности электрического поля на границе зоны отчуждения в пределах от 1 кВ/м до 3 кВ/м для различных штатов. В некоторых странах, например в Австралии, в исключительных случаях для линии 500 кВ допускается напряженность на границе зоны отчуждения 5 кВ/м.

Аналогичная ситуация и с нормированием допустимой напряженности магнитного поля промышленной частоты на рабочих местах и для населения. Рекомендации и нормы различных международных организаций и стран, как правило, не согласованы между собой, а приводимые в них значения напряженностей могут отличаться в несколько раз. В некоторых странах, в том

числе и в России, нормы для населения по допустимым напряженностям магнитного поля промышленной частоты отсутствуют.

В настоящее время наиболее обоснованными и полными представляются временные нормы ENV50166, предложенные Техническим комитетом CENELEC и действующие с 1995 г. Срок действия этих норм определен в три года, по прошествии которых они должны стать основными нормами EN-50166 или должны быть отозваны.

Остановимся кратко на содержании норм ENV50166. За базисное значение напряженности электрического поля при длительном воздействии приняты: постоянное поле — 42 кВ/м, переменное с частотой (0,1 - 4) Гц - 30 кВ/м (критерий воздействия поля на человека — ощущение поля по косвенным признакам). В диапазоне частот 4—1000 Гц базисным значением считается плотность тока в 10 мА/м², которому соответствуют уже приводимые значения напряженности 20 кВ/м и 4 кА/м. С учетом специфики механизмов изменения разности потенциалов на мембранах клеток при более низких частотах берется базовая плотность тока, обратно пропорциональная, а при более высоких — прямо пропорциональная частоте.

Базисным значением напряженности постоянного магнитного поля принято значение 1,6 МА/м. Впервые нормирован ток, протекающий через человека при контакте с объектами, находящимися в электрическом поле промышленной частоты: 3,5 мА на рабочих местах и 1,5 мА для населения.

Нормы по напряженности полей промышленной частоты на рабочих местах подразделяются на три категории. Первая категория - 6,1 кВ/м и 159 А/м - обязательна информация персонала о поле; вторая - 12,3 кВ/м, 320 А/м и выше - обязательны мероприятия по ограничению пребывания в поле; третья - 19,6 кВ/м и 480 А/м - обязательно, помимо ограничения пребывания в поле, предупреждение: «опасная работа». Для населения базисные значения берутся в 2,5 раза меньшими, чем на рабочих местах.

Следует отметить, что в области низких частот нормы ENV50166 дают более высокие напряженности полей на рабочих местах, чем прежние нормы IRPA. Вероятно, тенденция ослабления ограничений по напряженностям при нормировании может сохраниться и в дальнейшем, если будет доказано, что опасность вредного влияния полей на человека преувеличена.

Следует остановиться на последних отечественных санитарно-эпидемиологических правилах и нормативах СанПиН 2.2.4.11910S. В них установлены предельно допустимые уровни электромагнитных полей на рабочих местах.

Впервые установлены временные (сроком на 3 года) допустимые уровни ослабления геомагнитного поля в два раза в течение смены.

Предельно допустимые уровни постоянного магнитного поля составляют: при времени воздействия за рабочий день до 10 мин — 24 кА/м; при времени 11- 60 мин - 16 кА/м; при времени воздействия 61- 480 мин - 8 кА/м.

Уровень допустимого локально воздействующего поля повышается примерно в 1,5 раза.

Напряженность электрического поля частотой 50 Гц в течение всей смены может составлять 5 кВ/м. При сокращении времени воздействия допустимая напряженность увеличивается (до 20 кВ/м). При напряженности 20 - 25 кВ/м допустимое время пребывания человека в поле составляет 10 мин, а при напряженности выше 25 пребывания человека без применения средств защиты не допускается.

Предельно допустимые уровни напряженностей магнитного поля промышленной частоты, действующего на все тело человека, следующие: при времени пребывания до 1 часа за смену - 1600 А/м; до 2 час - 800 А/м; до 4 час - 400 А/м; до 8 час - 80 А/м.

При локальном воздействии (на конечности) предельно допустимые напряженности увеличиваются в 4-10 раз в зависимости от времени пребывания в поле. Импульсные поля частоты 50 Гц могут иметь напряженность в зависимости от режима генерации и времени воздействия, от 6000 А/м до 1400 А/м, то есть в несколько раз большую, чем при непрерывном воздействии.

В СанПиН 2.2.4.1191-03 нормированы допустимые напряженности, потоки мощности, экспозиции высокочастотных электромагнитных полей.

Нормирование условий работы персонала и проживания людей в зоне влияния ПС и ВЛ СВН

Исследования показали, что для персонала подстанций и линий СВН, длительно и регулярно находящегося под воздействием электрического поля, допустимые напряженности поля и длительности их воздействия не должны превышать значений, приведенных в табл. 7.3.

При выполнении этих условий обеспечивается самовосстановление физиологического состояния организма в течение суток без остаточных реакций и функциональных или патологических изменений.

Нормативные данные табл. 7.3 действительны, если остальное время рабочего дня человек находится в местах, где напряженность электрического поля меньше 5 кВ/м и исключена возможность воздействия на него электрических разрядов. При этом напряженность определяется на уровне головы человека (1,8 м над уровнем земли).

Следует отметить, что данные табл. 7.3 получены для периодического и длительного пребывания человека в электрическом поле, когда у него через 1 - 2 месяца выработался динамический стереотип восприятия поля. Единоразовно допускаются и большие кратковременные воздействия электрического поля.

При проектировании подстанций СВН определяются маршруты обхода, виды оперативных переключений при производстве ремонтов и других

работ; на моделях или по программе на ЭВМ рассчитывается напряженность электрического поля в этих местах и возможная длительность работ, что сравнивается с данными таблицы

Допустимая продолжительность работы персонала в электрическом поле промышленной частоты

Напряженность электрического поля кВ/м	Допустимая продолжительность пребывания персонала в течение суток, мин.
5	Без ограничения (в течение рабочего дня)
10	180
15	80
20-25	10

При невыполнении этих условий применяются меры по экранированию рабочих мест, тросовые экраны над дорогами, экранирующие козырьки и навесы над шкафами управления, вертикальные экраны между фазами и др.

Для ОРУ подстанции СВН наряду с расчетами, после ее пуска в эксплуатацию проводят измерения напряженности поля в различных точках, после чего при необходимости экранная защита усиливается. При ремонтных работах применяют съемные экраны. Предъявляются определенные требования к компоновке ОРУ, например не допускается расположение ошиновки над выключателями, чтобы обеспечить возможность их безопасного ремонта и др.

Для линий СВН, вблизи которых возможно нахождение персонала посторонних организаций и местного населения, на основании специально проведенных исследований установлены следующие нормативы по допустимой напряженности под линией без определения допустимой длительности пребывания: 20 кВ/м - для труднодоступной местности (болота, горные склоны и т. п.); 15 кВ/м - для ненаселенной местности; 10 кВ/м - для пересечений с дорогами; 5 кВ/м - для населенной местности.

Кроме того, нормируется допустимая напряженность на границах жилых застроек - 0,5 кВ/м, что допускает пребывание человека в электрическом поле неограниченное время в течение всей жизни.

Если, согласно расчетам, при расстоянии проводов до земли, определяемом перенапряжениями, напряженности под линиями 330 кВ не превышают 8,5 кВ/м, а под линиями 500 кВ - 14 кВ/м и не возникают затруднения при их сооружении в ненаселенной местности, то для линий более высокого класса напряжений расстояние до земли в той же местности определяется допустимой напряженностью - 5 кВ/м.

Напряженность поля имеет наибольшее значение под линией и по мере удаления от нее быстро уменьшается. Соответственно зона наибольшего влияния поля из-за провисания проводов находится в середине пролета, а

наименьшего - у опор, где высота подвеса проводов наибольшая и, кроме того, сказывается экранирующее действие самих опор. Поэтому дороги, трассы прогона скота, пешеходные дорожки, линии связи и линии более низкого напряжения рекомендуется размещать вблизи опор.

В охранной зоне линии (ее границы параллельны линии и внутри нее напряженность поля превышает 1 кВ/м, для линий 500 кВ - это 25 м, а 750 кВ - 40 м от крайних фаз) не разрешается размещение постоянных и временных жилых и производственных сооружений, регламентируется режим работы ремонтного персонала.

Если при пересечении линией дороги необходимо снизить напряженность, линия экранируется тросовыми экранами, выполненными из одного или двух тросов под каждой фазой, натянутых на железобетонных стойках и заземленных по концам.

Тросовые экраны могут применяться и для снижения напряженности электрического поля на границах жилых застроек (у стен жилых зданий).

Напряженности поля под линией при принимаемых обычно расстояниях проводов до земли для всех линий СВН значительно превышают допустимое для населенной местности значение - 5 кВ/м. Ввиду того, что этот норматив распространяется только на вновь строящиеся линии, в перспективе станет затруднительным вывод таких линий от крупных ТЭС и АЭС, которые расположены в городах или поселках, так как при этом расстояния от проводов линии до земли должны быть не менее 12 м для ЛЭП 330 кВ; 16,5 м для ЛЭП 500 кВ; 22 м для ЛЭП 750 кВ. Учитывая наличие на шинах станций и выводах линий более низких напряжений, в ряде случаев может оказаться экономичным осуществление таких выводов в виде комбинированных линий, у которых под цепью более высокого напряжения расположена цепь более низкого напряжения со сдвигом систем напряжений цепей на 120° за счет изменения фазировки нижней цепи (например, 330/110, 500/220, 750/330). Возможно также использование линий с сильным сближением фаз, экранировка линий и др.

В густонаселенной местности такие решения могут быть приняты и для всей линии электропередачи СВН, так как они не только снижают напряженность поля, но и повышают пропускную способность.

Вторичным фактором, оказывающим существенное влияние на условия работы в охранной зоне, является ток, стекающий с проводящего, но изолированного объекта при прикосновении к нему. Величина этого тока должна быть безопасна для местного населения, причем необходимо учитывать возможность соприкосновения с этими объектами не только мужчин, но также женщин и детей. В этих случаях используются американские данные, согласно которым безопасным для мужчин является ток 9 мА, для женщин - 6,5 мА, для детей - 4,5 мА (как уже отмечалось, ENV50166 устанавливает более жесткие нормы - 3,5 мА на рабочих местах и 1,5 мА для населения).

Стекающий ток при прикосновении человека определяется напряжением линии, емкостью объекта относительно линии, определяемой объемными параметрами объекта и активным сопротивлением человека. Этот ток эмпирически можно выразить как

$$I_{np} = K_{\phi} VE$$

Где K_{ϕ} - коэффициент формы объекта; V - объем объекта; E - напряженность поля на уровне 1,8 м над землей

Таким образом, стекающий ток пропорционален напряженности поля и объему объекта. Например, при напряженности поля 15 кВ/м комбайн СК-4 с прицепом дает стекающий ток 6—6,5 мА, крупные автобусы – 5 - 6 мА и т. д., т. е. этот ток может быть опасен для женщин и детей.

Вышесказанное регламентирует условия труда и нахождения местного населения в охранной зоне линии 750 кВ и выше, в частности, все сельскохозяйственные машины и механизмы должны быть оборудованы двумя заземляющими цепями с утяжеленными грузами на концах для обеспечения постоянного контакта с землей и сбрасываемыми заглубляемыми заземлителями.

Следует отметить, что эффективным средством ограничения напряженности поля под воздушными линиями электропередачи являются растительные массивы. Выполненные измерения показали, что в зоне сплошных растительных массивов высотой 3-4 м напряженность поля под линиями не отличается от напряженности поля земли ясного дня. В зоне фруктовых садов (яблони, вишни) с расстояниями между деревьями 6-8 м напряженность поля под ВЛ в междурядьях снижается в 2-3 раза по сравнению со случаем прохождения линии в полевых условиях. В кронах деревьев напряженность поля не отличается от напряженности поля земли ясного дня.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Какую роль играют электрические процессы при функционировании живых организмов?
2. Какие объекты являются источниками электрических и магнитных полей на объектах электроэнергетики, в промышленности, на транспорте, в быту?
3. В чем заключаются механизмы воздействия электрических и магнитных полей на живые организмы?
4. Назовите нормативные значения напряженностей электрических и магнитных полей на рабочих местах и для населения.
5. В чем заключается экологическое влияние коронного разряда?
6. В чем состоит влияния линий электропередачи на линии связи?

Список литературы:

Овсянников, А. Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебник / А. Г. Овсянников, Р. К. Борисов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 194 с. — 978-5-7782-2199-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47704.html>

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №9

Тема: Качество электрической энергии и его обеспечение

Цель: изучить показатели качества электроэнергии (ПКЭ) и влияние качества на электроприемники и системы электроснабжения, технологические процессы, объекты систем электроэнергетики;

Знания и умения: знать государственные стандарты качества электрической энергии в сетях переменного тока общего назначения и уметь делать обоснованные выводы о качестве электроэнергии в точках его контроля;

Актуальность темы: иметь представление о влиянии помех на качество электроэнергии

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Качество электрической энергии существенно влияет на работу электроприемников и их технико-экономические показатели. Рассмотрим типичные примеры негативного влияния отклонений по качеству электроэнергии.

Как известно, основной нагрузкой в электрических системах являются электрические двигатели, которые составляют около 60 % нагрузки электрических систем. Понижение частоты в системе приводит к уменьшению скорости вращения всех включенных в работу электродвигателей. При этом снижается производительность связанных с ними механизмов, что во многих случаях ухудшает их экономические показатели работы. При значительном повышении частоты в системе, что может быть, например, в случае уменьшения (сброса) нагрузки, возможно повреждение оборудования. Кроме этого, пониженная частота в электрической сети влияет и на срок службы оборудования, содержащего элементы со сталью (электродвигатели, трансформаторы, реакторы со стальным магнитопроводом), за счёт увеличения тока намагничивания в таких аппаратах и дополнительного нагрева стальных сердечников.

При работе ламп накаливания с пониженным по отношению к номинальному напряжением происходит уменьшение их светового потока, а, следовательно, и снижение освещённости рабочей поверхности. Так, при напряжении, равном $0,9U_{\text{ном}}$, световой поток и соответственно освещённость поверхности снижаются в среднем на 40 %. Это приводит к резкому снижению производительности труда работающих в помещениях, использующих для освещения такие лампы. Если напряжение, подводимое к лампе накаливания, равно $1,1U_{\text{ном}}$, световой поток и освещённость рабочей поверхности возрастают примерно на 40 %, что опять же неблагоприятно сказывается на производительности труда. Однако при этом происходит и сокращение срока службы лампы примерно в 4 раза.

Работа асинхронных двигателей зависит от напряжения на его зажимах. Расчёты показывают, что снижение напряжения на зажимах двигателя на 15% $U_{\text{ном}}$ приводит к снижению $M_{\text{эл}}$ до 72 % $M_{\text{ном}}$.

При снижении напряжения ухудшается и такая характеристика двигателя, как

коэффициент запаса по устойчивости, характеризуемый отношением максимального вращающего момента к номинальному, который регламентируется стандартами на конкретные виды асинхронных электродвигателей. При значительном снижении напряжения двигатель в конечном итоге может остановиться. В случае снижения напряжения на зажимах двигателя при неизменной мощности увеличивается ток, потребляемый им из сети. При этом происходит более интенсивный нагрев изоляции двигателя и соответственно снижается срок его службы. Так, если двигатель длительное время работает с уровнем напряжения на его зажимах, равном $0,9 U_{ном}$, то срок его службы сокращается примерно вдвое. Повышение напряжения на зажимах электродвигателя приводит к увеличению потребляемой им реактивной мощности.

При снижении напряжения на зажимах электротермических установок их работа существенно ухудшается, увеличивается длительность технологического процесса, повышается себестоимость продукции, получаемой при работе этих установок. При значительных изменениях напряжения и их отклонениях от номинальных значений может быть и полное расстройство технологического процесса.

Фактическое напряжение существенно влияет на качество сварки. При снижении напряжения до $0,9 U_{ном}$, время сварки увеличивается на 20 %, а при выходе его за пределы $(0,9...1,1) U_{ном}$ возникает брак сварных швов. Полный брак сварных швов при сварке обычных металлов наступает при выходе напряжения за пределы $\pm 5 \%$, а при сварке коррозионных и жаропрочных сталей - при $\pm 10 \%$.

Работа электролизных установок при пониженном напряжении приводит к снижению их производительности, повышению удельного расхода электроэнергии и к увеличению себестоимости продукции.

Для анализа качества электроэнергии выделим наиболее часто встречающиеся ненормальные ситуации. Самыми распространёнными являются: провалы и подъемы напряжения, длительные искажения формы кривой напряжения, переходные процессы (рисунок 1).



Рисунок 1 – Основные случаи ухудшения качества электроэнергии

Длительное повышение или понижение напряжения питающей сети приводит к сокращению срока службы двигателей и источников питания. При этом понижение напряжения более нежелательно, так как значительно возрастает ток потребления. Кроме того, понижение напряжения питания может привести к нарушению работы компьютеров и микроконтроллеров и выходу этих систем из строя.

К более отрицательным последствиям приводит полное пропадание питающего напряжения.

Кратковременные всплески и провалы напряжения вызываются переходными процессами в электрической системе, причём их можно разделить на две группы:

1) импульсные всплески, вызванные коммутацией активной и активно-индуктивной нагрузки;

2) переходные, как правило, гармонические процессы, вызванные коммутацией ёмкостных нагрузок.

Переходные процессы сопровождаются высокочастотными помехами, приводящими к сбою электронной аппаратуры. Всплеск напряжения может стать причиной выхода из строя потребителя, если не будет предусмотрена соответствующая защита. По этой причине к коммутационной и особенно защитной аппаратуре предъявляются повышенные требования по быстродействию и селективности.

Негативные влияния на силовое электрооборудование и измерительные приборы оказывают длительные искажения кривой напряжения. Особенно следует выделить искажения напряжения, имеющие характер «зазубрин» (notch), вызванные коммутацией силовых тиристоров и диодов в мощных источниках искажения.

Наиболее опасными являются искажения кривой напряжения вблизи перехода искажающего напряжения через ноль. Эти искажения могут вызвать дополнительные коммутации диодов маломощных источников питания, ускорение старения конденсаторов, сбой электронных часов, нарушение работы принтеров и другой аппаратуры.

Основным нормативным документом, где сформулированы требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения, является ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». В соответствии с этим ГОСТом часть показателей качества электроэнергии (ПКЭ) характеризует помехи, вносимые установившимся режимом работы электрооборудования энергоснабжающей организации и потребителей, т.е. вызванные особенностями технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. К ним относятся отклонения напряжения и частоты, искажения синусоидальности формы кривой напряжения, несимметрия и колебания напряжения. Для их нормирования ГОСТом установлены допустимые значения ПКЭ.

Другая часть ПКЭ характеризует кратковременные помехи, возникающие в электрической сети в результате коммутационных процессов, грозовых и атмосферных явлений, работы средств защиты и автоматики в послеаварийных режимах. К ним относятся провалы и импульсы напряжения, кратковременные перерывы электроснабжения. Для этих ПКЭ допустимых численных значений ГОСТ не устанавливает. Однако, параметры этих ПКЭ должны измеряться и составлять статистические массивы данных, характеризующие конкретную электрическую сеть в отношении вероятности появления кратковременных помех.

Если ПКЭ не соответствуют требованиям ГОСТа, то предъявляются претензии к поставщику - энергетическому предприятию. В целом ПКЭ определяют степень искажения напряжения электрической сети за счёт кондуктивных помех, вносимых как энергоснабжающей организацией, так и потребителями.

Следует отметить, что проблема качества электроэнергии в отечественных электрических сетях крайне специфична. Так, во всех промышленно развитых странах Запада подключение мощных нелинейных нагрузок, искажающих форму кривых тока и напряжения электрической сети, допускается только при соблюдении требований по обеспечению ПКЭ и при наличии соответствующих корректирующих устройств. При этом суммарная мощность вновь вводимой нелинейной нагрузки не должна превышать 3-5 % от мощности всей нагрузки энергокомпании. Иная картина наблюдалась в электрических сетях бывшего Советского Союза, где такие потребители подключались достаточно хаотично. Например, на момент ввода в работу электролизных корпусов Братского алюминиевого завода, являющегося мощным источником искажений, его суммарная мощность составляла более 30 % от мощности потребителей «Иркутскэнерго». Аналогичная картина наблюдалась и при подключении новых тяговых подстанций Байкало-Амурской магистрали, нагрузка которой является несинусоидальной, несимметричной и резкопеременной.

При этом промышленностью практически не выпускались необходимые средства повышения ПКЭ (фильтрокомпенсирующие, симметрирующие, многофункциональные оптимизирующие устройства и др.). В результате электрические сети России оказались перенасыщенными искажающим оборудованием.

В отдельных регионах, в частности в Восточной Сибири, сформировались уникальные по своей мощности и степени искаженности кривых тока и напряжения комплексы электрических сетей энергосистем и распределительных сетей потребителей и существенно обострилась проблема электроснабжения потребителей качественной электроэнергией.

Соблюдение энергоснабжающими организациями и потребителями показателей качества электроэнергии позволяет экономить не только топливно-энергетические ресурсы, но также и другие виды материальных ресурсов, часть которых при пониженном качестве электроэнергии тратится на бракуемую и утилизируемую продукцию.

Установлены два вида норм ПКЭ: нормально допустимые и предельно допустимые. Оценка соответствия показателей ПКЭ указанным нормам проводится в течение расчётного периода, равного 24 часам. Качество электроэнергии характеризуется параметрами режима в узлах электроэнергетической системы. В число этих параметров входят частота и напряжение. Частота является общесистемным параметром и определяется балансом активной мощности в системе. При возникновении дефицита активной мощности в системе происходит снижение частоты до такого значения, при котором устанавливается новый баланс вырабатываемой и потребляемой электроэнергии. При этом снижение частоты связано с уменьшением скорости вращения электрических машин и уменьшением их кинетической энергии. Освобождающаяся при этом кинетическая энергия используется для поддержания частоты. Поэтому частота в системе меняется сравнительно медленно. Однако, при дефиците активной мощности (более 30 %) частота меняется быстро и возникает эффект «мгновенного» изменения частоты - «лавины частоты».

Напряжение в узле электроэнергетической системы определяется балансом реактивной мощности по системе в целом и балансом реактивной мощности в узле электрической сети.

ГОСТ 13109-97 устанавливает 11 показателей качества электроэнергии: установившееся отклонение напряжения; размах изменения напряжения; доза фликера; коэффициент искажения синусоидальности кривой междупазного (фазного) напряжения; коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения; коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности; коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности; отклонение частоты; длительность провала напряжения; импульсное напряжение; коэффициент временного перенапряжения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Назовите основные случаи ухудшения качества электроэнергии
2. Назовите основные показатели качества электроэнергии
3. Охарактеризуйте влияние качества электрической энергии на электрооборудование

Список литературы:

Овсянников, А. Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебник / А. Г. Овсянников, Р. К. Борисов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 194 с. — 978-5-7782-2199-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47704.html>