

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Северо-Кавказский федеральный университет

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

Направление 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль)

Электропривод и автоматика промышленных установок и
технологических комплексов

Год начала обучения 2022

Содержание:

- 1. Предисловие.....4
- 2. Общие методические указания к выполнению работ.....4
- 3. Введение.....5
- 4. Теоретические сведения. Уровень помех и коэффициент экранирования6
- 5. Описание электромагнитных влияний.....6
- 6. Метод полных сопротивлений.....8
- 7. Задание для контрольных и домашних работ.....13
- 8. Контрольные вопросы.....18

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Целью контрольных работ (домашнего задания) является окончательная проверка усвоения студентами разделов курса. Приступать к выполнению работ следует после изучения соответствующего материала. При выполнении каждой задачи необходимо приводить задание с численными значениями, чертежи и схемы выполнять с принятыми буквенными обозначениями. В контрольной работе необходимо указать расчетные формулы, а конечный результат выделить из основного текста. Этапы выполнения должны иметь соответствующие пояснения. Вычисления возможно осуществлять с помощью микрокалькулятора или посредством пакетов математических программ на компьютере, подтверждая расчеты распечатками. Обязательно приведение размерности полученных результатов. Вывод формул в тексте не проводится.

Титульный лист работы содержит название института, кафедры фамилию, имя и отчество студента, шифр, соответствующий варианту (см. пример).

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитная совместимость (ЭМС) является современным понятием, объединяющим электромагнитные явления, такие как радиопомехи, влияния на сеть, перенапряжения, колебания напряжения сети, паразитные связи, фон промышленной частоты и т.д. В последнее время вопросы ЭМС благодаря применению микроэлектроники в системах автоматизации, а также из-за повсеместного увеличивающегося электромагнитного загрязнения окружающей среды приобрели особое значение.

По своему содержанию дисциплина объединяет изучение способов и средств борьбы с радиопомехами; вопросы нормального функционирования электронных систем и коммуникаций, систем автоматики, сетей и промышленных предприятий. Изучение дисциплины "Электромагнитная совместимость в электроэнергетике" предусматривает рассмотрение следующих тем:

основные определения; электромагнитная обстановка на объектах электроэнергетики; источники помех; чувствительные к помехам элементы; каналы передачи помех; уровни помех; помехоустойчивость; методы испытаний и сертификации элементов вторичных цепей на помехоустойчивость; влияние полей, создаваемых устройствами электроэнергетики на биологические объекты; нормы по допустимым напряженностям электрических и магнитных полей промышленной частоты для персонала и населения, Закон РФ об электромагнитной совместимости.

В настоящем указании приведена в конспективном порядке теория, касающаяся представления импульсных помех в частотной области, определения формы импульсной помехи по ее спектральной плотности распределения амплитуд, оценки уровней напряженности электрического и магнитного полей по методу Щелкунова (метод полных сопротивлений), в

пространстве экрана. Кроме этого в указаниях приведены задания к выполнению контрольных и домашних работ.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1. УРОВНЬ ПОМЕХ И КОЭФФИЦИЕНТ ЭКРАНИРОВАНИЯ

Для количественной оценки электромагнитной совместимости пользуются логарифмическими масштабами электрических и магнитных величин. Различают логарифм отношения уровней и степени передачи помехи.

Применяя десятичный логарифм, определим в децибелах напряжение, ток, напряженность полей, мощность, принимая базовыми величинами, соответственно $U_0=1$ мкВ, $I_0=1$ мкА, $E_0=1$ мкВ/м, $H_0=1$ мкА/м, $P_0=1$ пВт:

$$u = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_x}{U_0}\right), \quad i = 20 \cdot \lg\left(\frac{I_x}{I_0}\right), \quad e = 20 \cdot \lg\left(\frac{E_x}{E_0}\right), \quad H = 20 \cdot \lg\left(\frac{H_x}{H_0}\right),$$
$$P = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_x}{P_0}\right).$$

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

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

2. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ

Описание электромагнитных влияний осуществляют в частотных и временных областях. Поскольку передаточные свойства путей связи и

средств помехоподавления удобно представлять в частотной области, то для перехода из временной в частотную используют ряды и интегралы Фурье.

Для быстрой практической реализации преобразования Фурье используют ЭМС-номограмму. Она позволяет построить огибающую плотности распределения амплитуд, синтезировать импульс, эквивалентный помехе, учесть частотнозависимые свойства пути передачи и средства защиты.

Рассмотрим трапециевидный импульс, для которого плотность распределения амплитуд определяется выражением

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

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.

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

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

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

$$U(f)_{\text{дб}} = 20 \lg \left(\frac{2U_m \tau}{A_0} \right), \text{ где } A_0 = 1 \text{ мкВ} \cdot \text{с}$$

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

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

то есть 40 дБ/декаду.

Для перехода из частотной во временную область необходимо найти площадь импульса

$$U_m \tau = \frac{1}{2} 10^{\frac{u(f)_{\text{дб}}}{20}} \text{ мкВ} \cdot \text{с},$$

плотность распределения амплитуд импульса

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

крутизну фронта нарастания импульса

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

Длительность импульса определится из соотношения

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

Время нарастания импульса

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

3. МЕТОД ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Понятие помехоподавления характеризует степень защитного воздействия электромагнитного экрана, оно чаще всего указывается в функции частоты в децибелах или неперах это, так называемый, коэффициент экранирования:

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

Величины E и H в случае переменного электромагнитного поля связаны между собой посредством волнового сопротивления среды \underline{Z}

$$\frac{E}{H} = \underline{Z} = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\mu \cdot \mu_0}}. \quad (1)$$

Аналитический расчет экранирующего действия электромагнитных экранов требует решения уравнений Максвелла для областей внутри и вне экрана, а также в самой его стенке. Однако, этот метод математически трудоемок, поэтому и не получил широкого распространения.

Для быстрых практических оценок Щелкунов разработал простой способ определения коэффициента затухания, который основан на аналогии с распространением электромагнитных волн в электрически длинных двухпроводных линиях. Эти волны являются распространяющимися вдоль проводящих линий ТЕМ-волнами (электромагнитные волны с векторами напряженностей электрического и магнитного полей E и H , ориентированными перпендикулярно к направлению распространения), так что разработанные для них формальные методы нетрудно перенести на плоские волны в свободном пространстве. Необходимо просто заменить в уравнениях комплексные амплитуды входного и выходного напряжения, входного и выходного тока комплексными напряженностями электрического и магнитного полей.

Общий коэффициент затухания электромагнитного экрана состоит из коэффициента затухания вследствие отражения на граничных плоскостях P , коэффициента затухания из-за поглощения в стенке экрана Π (переход энергии электромагнитного поля в тепло), корректирующего коэффициента B , учитывающего многократные волны отражения внутри экрана:

$$\mathcal{A} = P + \Pi + B. \quad (2)$$

Рассмотрим расчет каждого из компонентов в отдельности.

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

$$\frac{E_{ВШ}}{E_{ЭВШ}} = \frac{(Z_{ВШ} + Z_{Э})}{2 \cdot Z_{Э}} \quad (3)$$

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

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

Введя обозначение $K = Z_{ВШ}/Z_{Э}$ эта формула принимает вид

$$\frac{E_{ВШ}}{E_{ВН}} = \frac{(1 + K)^2}{4 \cdot K} \quad (5)$$

Переходя к логарифмическим характеристикам получаем выражение для коэффициента затухания вследствие отражения

$$P_{дБ} = 20 \cdot \lg \frac{|(1 + K)^2|}{4 \cdot |K|} \quad (6)$$

для его определения необходимо знать волновые сопротивления.

Волновое сопротивление в пространстве источника помехи для дальней зоны

$$Z_{ВШ} = Z_0 = 377 \text{ Ом}, \quad (7)$$

для ближней зоны в высокоомных полях

$$Z_{ВШ} = Z_0 \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{0.018}{r \cdot f}, \quad (8)$$

В НИЗКООМНЫХ ПОЛЯХ

$$Z_{ВШ} = Z_0 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} = 7.9 \cdot 10^{-6} \cdot r \cdot f. \quad (9)$$

Волновое сопротивление стенки экрана

$$Z_{\mathcal{D}} = \sqrt{\frac{i \cdot \omega \cdot \mu}{(\sigma + i \cdot \omega \cdot \varepsilon)}}, \quad (10)$$

а при условии, что толщина стенки больше глубины проникновения

$$Z_{\mathcal{D}} = \sqrt{\frac{i \cdot \omega \cdot \mu}{\sigma}}. \quad (11)$$

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

1) дальняя зона

$$P_{\partial Б} = 108 - 10 \cdot \lg \frac{\mu \cdot f}{\sigma_r}, \quad (12)$$

2) электрическое поле в ближней зоне

$$P_{\partial Б} = 142 - 10 \cdot \lg \frac{\mu \cdot f^3 \cdot r^2}{\sigma_r}, \quad (13)$$

3) магнитное поле в ближней зоне

$$P_{\partial Б} = 75 - 10 \cdot \lg \frac{\mu}{f \cdot \sigma_r \cdot r^2}. \quad (14)$$

В этих соотношениях r - расстояние от источника помехи, м; f - частота, МГц; σ_r - относительная удельная электропроводность, за базовую принята электропроводность меди:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{5.8 \cdot 10^7}. \quad (15)$$

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

$$\frac{E_{\text{ЭВШ}}}{E_{\text{ЭВН}}} = e^{\alpha \cdot d} \quad (16)$$

В логарифмических величинах получаем:

$$\Pi_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg \frac{E_{\text{ЭВШ}}}{E_{\text{ЭВН}}} \quad (17)$$

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

$$\Pi_{\text{дБ}} = 13.14 \cdot d \cdot \sqrt{f \cdot \mu \cdot \sigma_r}, \quad (18)$$

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

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

$$B_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg \left| 1 - \frac{(K-1)^2}{(K+1)^2} \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} \right|, \quad (19)$$

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

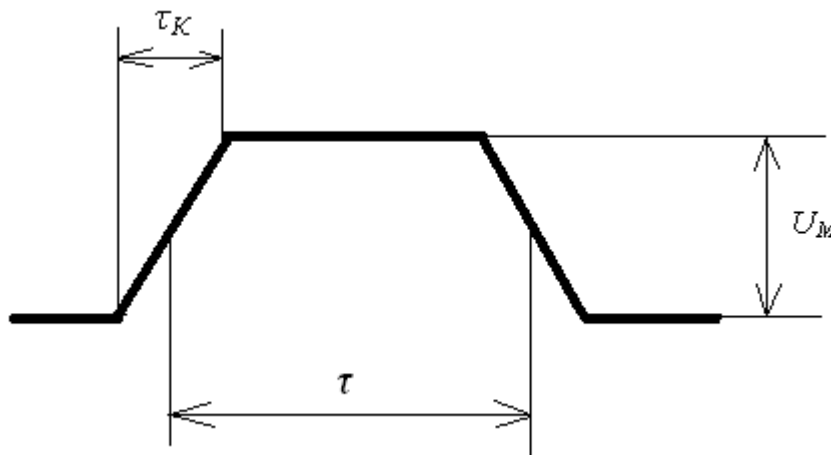


Рисунок 2 – Трапецевидный импульс

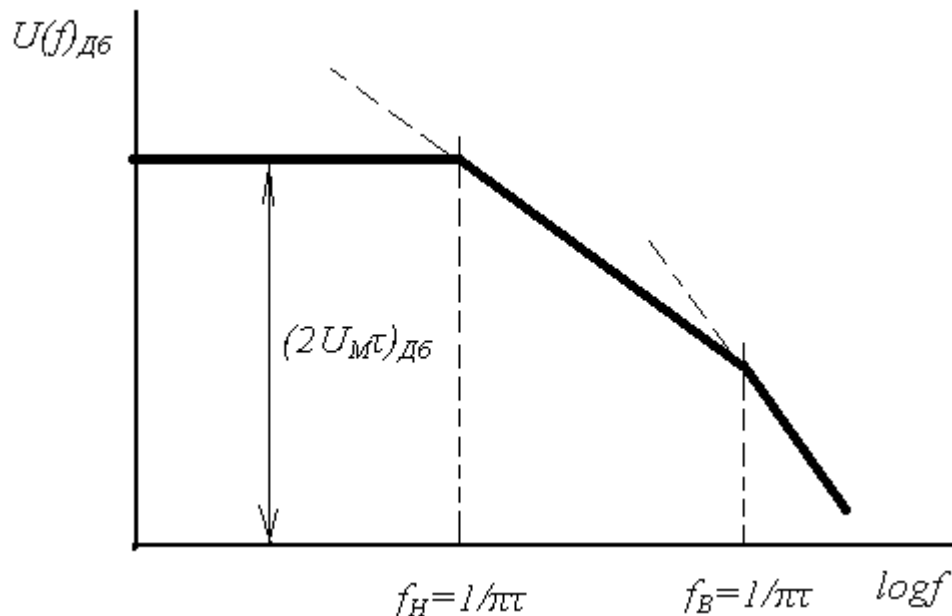


Рисунок 3 – Огибающая «физической» плотности распределения амплитуд трапецевидного импульса (линейная аппроксимация).

4. ЗАДАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЬНЫХ И ДОМАШНИХ РАБОТ

1. Дан импульс трапецевидной формы рис.2, амплитудой U_M , длительностью τ и временем нарастания τ_K . Параметры импульса указаны в таблице 1.

Требуется:

- а) аппроксимировать тремя отрезками прямых огибающую спектральной плотности распределения амплитуд;
- б) найти эффективную ширину Π полосы частот импульса;
- в) определить огибающую спектральной плотности распределения амплитуд по прохождению импульса через канал передачи, имеющий амплитудно-частотную характеристику $A(f)_{дб}$, представленную на рисунке 4, где a коэффициент затухания;
- г) найти амплитуду U_M , длительность τ , время нарастания τ_K , крутизну фронта U_m/τ_K импульса по данным спектральной плотности распределения амплитуд, полученной в пункте в). Построить этот импульс в системе координат U, t .

2. Даны параметры плоского экрана: относительные электрическая ϵ и магнитная μ проницаемости, проводимость σ , толщина d . Известна частота излучения f , напряженности электрического E и магнитного H полей вне экрана. Данные приведены в таблице 2.

Требуется:

- а) рассчитать по методу полных сопротивлений коэффициенты затухания электромагнитного экрана в ближней зоне на расстоянии равном половине её максимального диаметра, в дальней зоне;
- б) определить величины напряженностей электрического и магнитного полей внутри экрана для ближней и дальней зон.

3. Ответить на контрольный вопрос, данный в таблице 2.

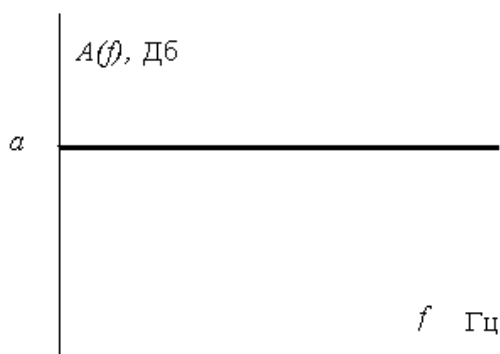


Рисунок 4 – Амплитудно-частотная характеристика канала передачи помех.

Таблица 1 – Параметры импульсной помехи.

№ варианта	U_M , В	τ , мс	$\tau_{K,}$, мс	a , Дб	№ варианта	U_M , В	τ , мс	$\tau_{K,}$, мс	a , Дб
1	1	10	0	10	26	3.2	10	10	30
2	2	20	0	15	27	2.2	20	20	25
3	3	10	1	20	28	1.8	15	15	10
4	4	20	1	25	29	2.75	7	7	20
5	5	10	0	30	30	3.75	7	1	30
6	6	25	0	30	31	4.25	8	2	40
7	7	10	5	60	32	6.25	9	3	50
8	8	20	5	65	33	6.75	10	2	50
9	9	10	10	65	34	3.2	11	1	35
10	10	20	20	80	35	2.3	12	12	15
11	2.5	15	5	30	36	9.1	13	5	60
12	1.5	1	0.1	15	37	7.75	14	4	50
13	4.5	4	0.2	60	38	0.75	15	3	10
14	8.5	10	1	60	39	0.5	16	2	10
15	10.5	15	5	90	40	1.2	17	1	15
16	7.5	1	0.1	80	41	1.75	18	18	15
17	6.5	2	0.2	50	42	1.25	19	9	10
18	5.5	5	0.1	40	43	2.7	20	8	30
19	1.5	10	3	10	44	6.7	21	7	60
20	3.5	7	3	35	45	7.7	22	6	70
21	1.25	8	2	20	46	9.75	23	5	75
22	2.25	15	2	40	47	7.25	24	4	60
23	3.25	20	5	50	48	5.25	25	3	30
24	4.25	20	1	50	49	4.25	26	2	30
25	5.25	10	0	50	50	5	27	1	40

Таблица 2 – Варианты заданий к расчету экранирующего действия и контрольные вопросы.

№ варианта	$\sigma \times 10^6$ См/м	μ	d мм	f МГц	$H_{ВШ}$ А/м	$E_{ВШ}$ В/м	№ вопроса
1	0.2	3	4	5	6	7	8
1	0.58	1	1	0.05	-	100	1
2	0.105	1	3	0.006	-	100	2
3	0.06	1	2	0.1	-	100	3
4	0.026	1	1	0.5	-	50	4
5	0.02	200	0.5	0.2	-	100	5
6	0.015	1	5	0.2	-	200	6
7	0.58	1	2	0.1	-	50	7
8	0.105	1	0.5	0.1	-	150	8
9	0.06	1	5	0.04	-	200	9
10	0.026	0.1	1.5	0.01	-	200	10
11	0.015	1	2	0.1	3	-	11
12	0.58	1	3	0.02	5	-	12
13	0.105	1	4	0.015	1	-	13
14	0.06	1	3	0.03	0.5	-	14
15	0.026	100	2	0.05	2	-	15
16	0.015	1	1	1	4	-	16
17	0.58	1	0.1	0.03	2	-	17
18	0.105	1	0.2	0.07	5	-	18
19	0.06	1	0.3	0.08	3	-	19
20	0.026	120	0.2	0.07	1	-	20
21	0.02	100	0.78	0.8	3	-	21
22	0.002	50	1	0.045	3	-	22

23	0.115	1	0.075	2	2	-	23
1	2	3	4	5	6	7	8
24	0.58	1	0.01	0.05	1	-	24
25	0.105	1	0.1	1	2	-	25
26	0.06	1	1	1	3	-	26
27	0.026	1	2	0.02	1	-	27
28	0.02	30	0.5	0.5	1	-	28
29	0.015	1	0.75	0.2	2	-	29
30	0.002	20	0.2	0.35	4	-	30
31	0.58	1	0.1	1	-	10	31
32	0.105	1	0.2	1.5	-	30	32
33	0.06	1	0.25	1	-	80	33
34	0.026	1	0.75	0.75	-	50	34
35	0.02	30	1	0.01	-	150	35
36	0.015	1	0.8	0.075	-	30	36
37	0.02	80	1	0.05	-	100	37
38	0.58	1	1	0.03	-	150	38
39	0.105	1	2	0.1	-	75	39
40	0.06	1	5	0.8	-	60	40
41	0.026	1	0.3	0.75	-	50	41
42	0.02	40	0.55	0.065	-	75	42
43	0.015	1	0.2	1	-	250	43
44	0.002	200	1	0.75	-	200	44
45	0.58	1	0.8	0.9	-	75	45
46	0.105	1	0.01	0.8	-	50	46
47	0.06	1	1	0.75	-	100	47
48	0.026	1	2	2	-	150	48
49	0.02	10	0.1	1	-	100	49
50	0.015	1	1	3	-	120	50

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Охарактеризуйте природу электромагнитных влияний и пути их передачи.
2. Охарактеризуйте источники широкополосных помех.
3. Дайте характеристику источникам узкополосных помех, приведите примеры.
4. Классифицируйте окружающую среду по помехам, связанным с электромагнитным излучением.
5. Механизмы передачи помех через гальваническую связь и способы их ослабления.
6. Передача помех через емкостную и индуктивную связи и методы их ослабления.
7. Разрядные устройства в электроэнергетических установках как элементы обеспечивающие ЭМС.
8. Охарактеризуйте способы электростатического экранирования и опишите физический механизм явления.
9. Опишите способы магнитного экранирования, а так же физический механизм явления.
10. Экранирование в переменном электромагнитном поле.
11. Способы и средства измерения напряжения и тока помехи.
12. Способы и средства измерения напряженностей электрического и магнитного полей помехи.
13. Экранирующие действия оболочки кабеля.
14. Как осуществляется подавление помех, создаваемых коллекторными двигателями.
15. Воздействия электромагнитных полей на биологические организмы.
16. В чем состоит и для чего проводится спектральный анализ помех.
17. Как осуществляется обеспечение электромагнитной совместимости в лабораториях.
18. Нормы в области электромагнитной совместимости.
19. Классифицируйте окружающую среду по помехам идущим по проводам.

20. Дать понятие и привести примеры противофазных и синфазных помех, и способов их ослабления.
21. Дать понятия Земли и массы.
22. Описание электромагнитных влияний в частотной и временной областях.
23. Воздушные линии высокого напряжения как источники помех.
24. Электромагнитная связь через контур заземления.
25. Помехи в измерительных линиях.
26. L-, C-, LC- фильтры для подавления помех и их конструкции.
27. Разделительные трансформаторы как элементы обеспечивающие ЭМС.
28. Как осуществляется испытание на устойчивость к помехам.
29. Как и для чего осуществляется экранирование помещений.
30. Как осуществляется выбор материала экрана для дальней и ближней зон.
31. Уровни помех и их измерение.
32. Оценка качества электрической энергии.
33. Защита в сетях электропитания как элемент ЭМС.
34. Экспериментальное определение помехоустойчивости.
35. Снижение проникших помех средствами вычислительной техники.
36. Сетевые фильтры как элементы обеспечивающие ЭМС.
37. Материалы для изготовления экранов.
38. Идентификация механизмов связи.
39. Электромагнитные импульсы и их характеристики.
40. Передатчики связи как источники помех.
41. Борьба с проникшими помехами программными средствами.
42. Мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости.
43. Помехоустойчивость и стойкость к повреждению чувствительных элементов.
44. Электромагнитная совместимость в силовом оборудовании.
45. Источники широкополосных помех и их подавление.
46. Противофазные и синфазные помехи и их подавление.
47. Способы описания электромагнитных влияний.

48. Механизмы ослабления гальванических связей.
49. Представление импульсных помех в частотной и временной областях.
50. Как обеспечивается электромагнитная совместимость на предприятиях?