



Министерство образования и науки Украины  
Севастопольский национальный технический университет

Методические указания  
к контрольной работе № 1 по дисциплине  
«РАДИОИЗМЕРЕНИЯ»  
для студентов направления 0907 — «Радиотехника»  
заочной формы обучения

Севастополь  
2005

УДК 621.317.08(075.8)

Методические указания к контрольной работе № 1 по дисциплине «Радиоизмерения» для студентов направления 0907 — «Радиотехника» заочной формы обучения /Сост. И.Л. Ветров. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. —32с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам заочной формы обучения в выполнении и оформлении контрольной работы по дисциплине «Радиоизмерения». Приводятся контрольные задания, требования к их выполнению, содержанию и оформлению контрольной работы. Методические указания составлены в соответствии с программой дисциплины «Радиоизмерения» для высших учебных заведений Украины.

Методические указания предназначены для студентов заочной формы обучения по направлению 0907 — Радиотехника.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники  
(протокол № 5 от 30 декабря 2005 г.)

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний

Рецензент:

Зиборов С.Р. кандидат технических наук, доцент кафедры РТ

Ответственный за выпуск

Заведующий кафедрой

радиотехники,

д-р техн. наук., доцент

Ю.Б. Гимпилевич

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### Основная литература

1. Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения/Ф.В. Кушнир. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 318 с.
2. Кукуш В.Д. Электрорадиоизмерения/ В.Д Кукуш. — М.: Радио и связь, 1985. — 368 с.
3. Кушнир Ф.В. Измерения в технике связи/ Ф.В Кушнир, В.Г. Савенко, С.М. Верник. — М.: Высш. Шк., 1976. — 432 с.
4. Дворяшин Б.В. Радиотехнические измерения/Б.В. Дворяшин, Л.И. Кузнецов. — М.: Сов. радио, 1978. — 359 с.
5. Основы метрологии и электрические измерения. Учебник для вузов/Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; Под ред. Е.М. Душина. — 6 изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.
6. Кузнецов В.А. Метрология. Учебное пособие/ В.А. Кузнецов, Г.В. Ялунина. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. — 336 с.

### Дополнительная литература

7. Бондаренко И.К. Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов/И.К. Бондаренко, Г.А. Дейнега, З.В. Маграчев. — М.: Сов. радио, 1969. — 301 с.
8. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ./Ф. Мейзда. — М.: Мир, 1990.— 536 с.
9. Абубакиров Б.А. Измерение параметров радиотехнических цепей/Б.А. Абубакиров, К.Г. Гудков, Э.В. Нечаев. — М.: Радио и связь, 1984. — 248 с.
10. Измерения в электронике: Справочник /В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др.; Под ред. В.А. Кузнецова. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 512 с.
11. Исаев Л.К. Метрология и стандартизация в сертификации/ Л.К. Исаев В.Д. Малинский. — М.: Издательство стандартов, 1996. — 179 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Содержание дисциплины.....	4
2. Оформление контрольной работы .....	6
3. Теоретические сведения.....	7
3.1. Общие сведения о погрешностях измерений .....	7
3.2. Электронные вольтметры .....	8
3.2.1. Характеристики переменных напряжений .....	9
3.2.2. Влияние формы периодических напряжений на показания вольтметров.....	13
3.3. Измерение параметров конденсаторов и катушек индуктивности ..	15
3.3.1. Измеряемые величины .....	15
3.3.2. Мосты переменного тока .....	18
3.3.3. Измерение емкости.....	19
3.3.4. Измерение индуктивности .....	20
3.4. Измерение параметров микроволновых цепей .....	21
3.4.1. Измеряемые величины .....	21
3.4.2. Метод измерительной линии .....	24
4. Контрольные задания .....	27
4.1. Задача 1.....	27
4.2. Задача 2.....	28
4.3. Задача 3.....	28
4.4. Задача 4.....	28
4.5. Задача 5.....	29
Библиографический список.....	30

## ВВЕДЕНИЕ

Целью преподавания дисциплины «Радиоизмерения» (РИ) является изучение студентами:

- физических основ функционирования и принципов построения измерительных преобразователей и приборов;
- основных уравнений и параметров радиоизмерительных приборов (РИП);
- особенностей применения РИП для исследования характеристик сигналов и цепей;
- теоретических основ структурных и алгоритмических методов достижения требуемых параметров РИП и их узлов;
- принципов построения цифровых и микропроцессорных приборов, а также принципов построения информационных измерительных систем.

В результате изучения дисциплины студент должен уметь:

- правильно применять радиоизмерительные приборы с целью определения основных характеристик сигналов и цепей;
- обосновать методику измерения, выбрать средство измерения, оценить погрешность измерения;
- разработать функциональные схемы измерительных приборов и обосновать основные требования к их узлам.

Изучение дисциплины базируется на знаниях, полученных при освоении предшествующих дисциплин: физики; высшей математики; основ теории цепей; сигналов и процессов в радиотехнике; метрологии; аналоговых электронных устройств.

## 1. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Содержание дисциплины включает следующие вопросы.

1. Классификация средств измерений по виду измеряемой величины и по роли в системе обеспечения единства измерений.
2. Метрологическая последовательность передачи размеров единиц.
3. Усилители измерительных приборов и их основные характеристики.
4. Основные характеристики измерительных преобразователей переменного напряжения в постоянное напряжение.
5. Принцип действия и характеристики термоэлектрических преобразователей.
6. Принципы действия и характеристики пиковых (амплитудных) детекторов.

Таблица 4.4 — Исходные данные к задаче 4

Наименование параметра	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1$ , кОм	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$R_2$ , кОм	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
$R_3$ , кОм	$10+m$	$11+m$	$12+m$	$13+m$	$14+m$	$15+m$	$16+m$	$17+m$	$18+m$	$19+m$
$C_1$ , мкФ	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19
$f$ , Гц	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900

### 4.5. Задача 5

При исследовании нагрузки с помощью измерительной линии получены максимальные  $U_{\text{МАКС}}$  и минимальные  $U_{\text{МИН}}$  показания индикатора. В случае короткого замыкания измерительной линии минимальным показанием индикатора соответствуют показания шкалы перемещения зонда  $l_k$ , а при подключении нагрузки —  $l_{\text{Н1}}$  (рисунок 3.13). Как при коротком замыкании измерительной линии, так и при подключении исследуемой нагрузки соседние минимальные показания индикатора отстоят по шкале перемещения зонда на  $\Delta l$ .

Определите коэффициент стоячей волны  $K_{\text{СТУ}}$ , коэффициент отражения  $\Gamma$  и сопротивление  $Z_{\text{Н}}$  исследуемой нагрузки, пренебрегая потерями в измерительной линии и учитывая, что в измерительной линии детектор работает в квадратичном режиме пренебрегайте. Исходные данные для расчетов приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 — Исходные данные к задаче 5

Наименование параметра	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\text{МАКС}}$	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$U_{\text{МИН}}$	$50+m$	$60+m$	$70+m$	$40+m$	$45+m$	$55+m$	$65+m$	$75+m$	$50+m$	$40+m$
$l_k$ , мм	50	60	55	45	50	40	45	40	50	45
$l_{\text{Н1}}$ , мм	25	50	50	45	40	35	35	30	35	40
$\Delta l$ , мм	50	45	40	35	30	25	20	25	30	40

#### 4.2. Задача 2.

Мощность, рассеиваемую в нагрузке, измеряют косвенным методом с помощью вольтметра класса точности  $\mu_B$  и амперметра класса точности  $\mu_A$ . Предел шкалы вольтметра  $U_{III}$ , предел шкалы амперметра  $I_{III}$ . Результаты измерений тока  $I_{ИЗМ}$  и напряжения  $U_{ИЗМ}$  приведены в таблице 4.2.

Оцените максимальную погрешность измерения мощности. Сопротивление вольтметра считайте бесконечным, а сопротивление амперметра — нулевым.

Таблица 4.2 — Исходные данные к задаче 2

Наименование параметра	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{ИЗМ}, В$	9	0,9	2,8	2,8	7,5	4,6	0,65	2	3	6,8
$I_{ИЗМ}, А$	7	0,55	0,7	0,9	0,25	0,4	0,35	1	4	0,15
$\mu_B$	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	4	6	4	2,5
$U_{III}, В$	10	1	3	5	10	5	1	3	5	10
$\mu_A$	1,0	1,5	2,5	4	6	1,0	1,5	2,5	4	6
$I_{III}, А$	$10+m$	$1+m$	$3+m$	$1+m$	$0,3+m$	$0,5+m$	$1+m$	$3+m$	$10+m$	$0,3+m$

#### 4.3. Задача 3.

Определите значения индуктивности  $L_3$ , сопротивления  $r_{L3}$ , добротности  $Q_L$ , в цепи уравновешенного моста (рисунок 3.9), если заданы сопротивления  $R_1, R_2, R_3$ , емкость  $C_1$  и частота  $f$  напряжения питания моста. Исходные данные для расчета приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 — Исходные данные к задаче 3

Наименование параметра	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1, Ом$	100	110	120	130	140	150	160	170	189	190
$R_2, Ом$	1000	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180
$R_3, Ом$	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4700	4800	4900
$C_1, мкФ$	$1,0+m$	$1,1+m$	$1,2+m$	$1,3+m$	$1,4+m$	$1,5+m$	$1,6+m$	$1,7+m$	$1,8+m$	$1,9+m$
$f, Гц$	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900

#### 4.4. Задача 4

Определите емкость  $C_3$  и тангенс угла потерь  $\text{tg}\delta$  конденсатора, если измерение выполнено по схеме измерительного моста, показанного на рисунке 3.7, на частоте  $f$ . Значения емкости  $C_1$ , сопротивлений  $R_1, R_2$  и  $R_3$  приведены в таблице 4.4.

7. Принципы действия и характеристики детекторов средневыпрямленных значений.
8. Принцип действия и характеристики детекторов среднеквадратических значений.
9. Принцип действия и характеристики детекторов СВЧ.
10. Принцип действия гетеродинного преобразователя частоты.
11. Назначение и основные характеристики цифро-аналоговых (ЦАП) и аналого-цифровых преобразователей (АЦП).
12. Принцип действия и характеристики АЦП поразрядного приближения.
13. Принцип действия и характеристики АЦП прямого преобразования.
14. Принцип действия и характеристики АЦП двухтактного интегрирования.
15. Принцип действия и характеристики фазочувствительных синхронных детекторов.
16. Структурные схемы электронных вольтметров пиковых (амплитудных), средневыпрямленных и среднеквадратических значений напряжений.
17. Структурные схемы цифровых электронных вольтметров.
18. Структурные схемы импульсных вольтметров.
19. Структурная схема универсального осциллографа. Канал управления лучом и режимы работы канала горизонтальной развертки.
20. Структурные схемы многоканального и многолучевого осциллографов.
21. Структурная схема и принцип работы стробоскопического осциллографа.
22. Принцип действия цифровых осциллографов.
23. Измерение параметров сигналов с помощью осциллографа.
24. Измерение разности фаз методом суммы и разности сигналов.
25. Преобразование разности фаз сигналов в напряжение с промежуточным преобразованием во временной интервал.
26. Измерение разности фаз сигналов методом дискретного счета.
27. Измерение разности фаз методом замещения.
28. Принципы построения фазовращателей низкочастотных, высокочастотных, микроволновых.
29. Измерение частоты сигналов резонансным методом и его реализация на СВЧ.
30. Измерение частоты методом сравнения и его реализация.
31. Измерение интервалов времени, периода и частоты сигнала методом дискретного счета.
32. Измерение частоты сигнала методом заряда и разряда конденсатора.
33. Принцип действия анализатора спектра с параллельным анали-

зом.

34. Принцип действия анализатора спектра с последовательным анализом.

35. Методы измерения нелинейных искажений сигналов.

36. Измерение мощности микроволновых сигналов, калориметрическим и терморезисторным методами.

37. Измерение проходящей мощности микроволновых сигналов.

38. Мостовой метод измерения параметров цепей.

39. Резонансный метод измерения параметров цепей. Измерители добротности и их принцип действия.

40. Основные параметры микроволновых цепей.

41. Измерение параметров микроволновых цепей с помощью измерительной линии.

42. Измерения параметров микроволновых цепей с помощью рефлектометров.

43. Поляризационные измерители параметров микроволновых цепей.

44. Панорамные измерители модулей коэффициентов отражения и передачи.

45. Измерение комплексных параметров микроволновых цепей.

46. Основы автоматизации радиоизмерений. Многофункциональные приборы.

47. Автоматизация обработки информации при косвенных измерениях, применение встроенных ЭВМ.

## 2. ОФОРМЛЕНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. По дисциплине «Радиоизмерения» студенты заочной формы обучения выполняют одну контрольную работу, включающую 5 задач.

2. Выбор варианта задачи производят по последней  $n$  и предпоследней  $m$  цифрам номера зачетной книжки.

3. Контрольную работу выполняют в отдельной ученической тетради, обязательно указывая на лицевой стороне тетради фамилию, имя, отчество студента, группу, дисциплину, адрес студента и номер зачетной книжки.

4. Рисунки и построения выполняют простым карандашом с применением чертежных инструментов. Для построения графиков зависимостей допускается применение цветной пасты, фломастеров и др.

5. При использовании формул без их вывода обязательны ссылки на библиографические источники, которые дают в квадратных скобках:  $[k]$ , где  $k$  — порядковый номер источника в библиографическом списке. Библиографический список, оформляют в соответствии с требованиями государственных стандартов и приводят конце контрольной работы.

6. Условие задачи необходимо переписать полностью, указав исход-

## 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

### 4.1. Задача 1.

Определить средневыпрямленное  $U_{СВ}$  и действующее  $U$  значения напряжения  $u(t)$ , если известны показания вольтметра  $U_B$ , тип вольтметра и форма напряжения  $u(t)$ . Исходные данные для расчетов напряжений взять из таблицы 4.1 и рисунка 4.1.

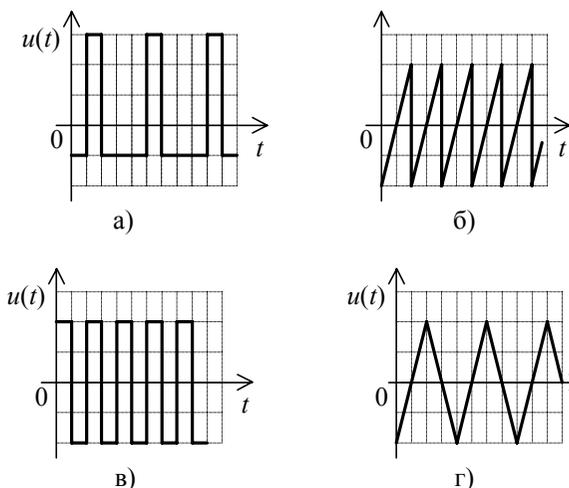


Рисунок 4.1 — Временные диаграммы напряжений к задаче 1

Таблица 4.1 — Исходные данные к задаче 1.

Номер варианта	$U_B$ , В	Тип вольтметра	Временная диаграмма (рисунок 4.1)
0	$9+m$	Пиковых значений	$\bar{b}$
1	$8+m$	Действующих значений	$a$
2	$7+m$	Средневыпрямленных значений	$z$
3	$6+m$	Пиковых значений	$v$
4	$5+m$	Действующих значений	$\bar{b}$
5	$4+m$	Средневыпрямленных значений	$a$
6	$3+m$	Пиковых значений	$z$
7	$2+m$	Действующих значений	$v$
8	$1+m$	Средневыпрямленных значений	$\bar{b}$
9	$0,5+m$	Пиковых значений	$a$

$$K_{CTU} = \sqrt{\frac{U_{\text{МАКС}}}{U_{\text{МИН}}}} = \frac{E_{\text{МАКС}}}{E_{\text{МИН}}} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}; \quad (3.42)$$

$$\Gamma = \frac{K_{CTU} - 1}{K_{CTU} + 1}. \quad (3.43)$$

Аргумент коэффициента отражения  $\varphi$  определяют по характеру смещения минимумов (максимумов) относительно положения минимумов (максимумов) поля, возникающих при подключении к линии нагрузки  $Z_0$  с известным коэффициентом отражения. В качестве нагрузки  $Z_0$  обычно применяют короткозамыкатель, у которого  $\Gamma_0=1$  и  $\varphi_0=\pi$ . На рисунке 3.13 показаны зависимости показаний  $U$  индикатора измерительной линии с квадратичным детектором от положения  $l$  зонда при коротком замыкании  $Z_0$  линии и при нагрузке  $Z_H$ . Поскольку картина стоячих волн повторяется вдоль линии через  $\lambda/2$ , то расстояние  $l_1=l_{H1}-l_K$  или  $l_2=l_K-l_{H2}=\lambda/2-l_1$  можно определять относительно любой точки, соответствующей минимуму показаний индикатора при коротком замыкании линии.

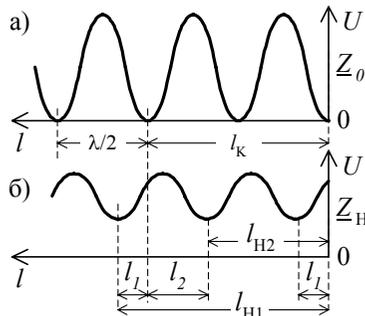


Рисунок 3.13 — Зависимости показаний индикатора от  $l$ : при коротком замыкании линии (а); при исследуемой нагрузке (б)

Измерения с помощью измерительной линии являются наиболее простыми. Погрешность измерения  $K_{CTU}=2$  составляет 2 ... 10 %, а погрешность измерения аргумента коэффициента отражения —  $1 \dots 10^0$ . [7, 9]

Фазу коэффициента отражения рассчитывают по одной из формул:

$$\varphi = 2\beta l_1 - \pi; \quad (3.44)$$

$$\varphi = \pi - 2\beta l_2. \quad (3.45)$$

По известным  $\Gamma$  и  $Z_B$ , в соответствии с (3.40), можно найти сопротивление нагрузки

$$Z_H = Z_B \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}. \quad (3.46)$$

ные данные. Задачи сопровождаются подробными объяснениями и математическими выкладками. При подстановке числовых значений необходимо использовать международную систему единиц (СИ).

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

#### 3.1. Общие сведения о погрешностях измерений

Применяемые на практике средства измерений должны обеспечивать заданную точность измерений, слабую зависимость показаний от состояния окружающей среды, стабильность параметров в течение времени эксплуатации.

*Точность измерения* — это качество измерения, отражающее близость результата измерения к истинному значению измеряемой величины. Высокая точность измерения соответствует малой погрешности измерения, которая может быть выражена в виде абсолютной, относительной или приведенной погрешностей.

*Абсолютная* погрешность измерения равна разности результата измерения  $U_X$  и действительного значения  $U_0$  измеренной величины

$$\Delta U = U_X - U_0. \quad (3.1)$$

Размерность абсолютной погрешности соответствует размерности измеряемой величины.

*Относительная* номинальная погрешность — это отношение абсолютной погрешности к результату измерения

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_X}. \quad (3.2)$$

*Приведенная* погрешность измерения — это отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению

$$\delta_{II} = \frac{\Delta U}{A}, \quad (3.3)$$

где  $A$  — нормирующее значение, в качестве которого обычно применяют предельное значение шкалы прибора.

По причинам возникновения погрешности разделяют на две группы: объективные и субъективные (личные). *Объективные* погрешности, не связанные с человеком — оператором, производящим измерения, а *субъективные* (личные) погрешности обусловлены экспериментатором, состоянием его органов чувств, опытом и т.д. Объективные погрешности разделяются

на *инструментальные* погрешности, *методические* погрешности и погрешности, обусловленные внешними условиями.

*Инструментальными* называют погрешности из-за несовершенства средств измерения, их схем, конструкций, состояния в процессе эксплуатации. Каждое средство измерения характеризуется свойственной ему погрешностью, которая входит в общую погрешность измерения.

*Методическими* называют погрешности, вызванные недостаточной разработанностью теории физических явлений, положенных в основу измерения, использованием приближенных аналитических зависимостей вместо более точных.

*Основной* погрешностью средства измерения называют погрешность в условиях, принятых за нормальные.

*Дополнительными* называют погрешности, возникающие вследствие работы средства измерения в условиях отличных от нормальных, т.е. условий, при которых была произведена их градуировка. Эти погрешности могут быть вызваны влиянием температуры окружающей среды, частоты сигнала, изменением напряжения питания и др.

### 3.2. Электронные вольтметры

Электронные аналоговые вольтметры представляют собой средства измерений напряжения, осуществляющие преобразование сигналов измерительной информации с помощью аналоговых электронных устройств. По назначению и принципу действия вольтметры подразделяют на вольтметры постоянного тока, переменного тока, универсальные, импульсные и селективные. Они обладают высокой чувствительностью, широким диапазоном измеряемых напряжений (от десятков нановольт до десятков киловольт), большим входным сопротивлением (более 1 МОм) и могут работать на частотах до 1 ... 2 гигагерц.

Стрелочные аналоговые электронные вольтметры характеризуют восьмью классами точности. Эти классы, соответствуют следующим значениям основной приведенной погрешности, выраженной в процентах: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 6,0.

Для определения класса точности  $\mu$  вольтметра находят величину максимальной приведенной погрешности

$$\delta_{\text{ПМ}} = \frac{\Delta U_{\text{М}}}{A} 100 \%,$$

где  $\Delta U_{\text{М}}$  — максимальное значение абсолютной погрешности в пределах шкалы;  $A$  — предел шкалы.

Полученное значение  $\delta_{\text{ПМ}}$  сравнивают с установленным числовым рядом, и принимают в качестве класса точности  $\mu$  вольтметра ближайшее

рительная линия (рисунок 3.12) состоит из следующих частей: основной линии; зонда; детектора; индикаторной головки.

Основная линия представляет собой отрезок стандартного волновода длиной около трех длин волн с продольной щелью, вдоль которой на скользящей каретке перемещается погружаемый в основную линию зонд и детектор сигнала. Сигнал с детектора подается на индикатор. Положение зонда фиксируют по шкале, расположенной вдоль основной линии.

Электрическое поле основной линии наводит в зонде переменную ЭДС, которая детектируется и, уже в виде постоянного напряжения, поступает на индикатор. Поскольку величина ЭДС мала, то детектор работает в квадратичном режиме и его выходное напряжение пропорционально квадрату амплитуды напряженности поля в точке нахождения зонда. Показания индикатора, в этом случае, можно представить в виде

$$U_{\text{и}} = qE^2,$$

где  $q$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий конструктивные особенности измерительной линии.



Рисунок 3.12 — Схема измерения параметров нагрузки с помощью измерительной линии

Зная положение зонда и показания индикатора, можно построить распределение напряженности поля в основной линии и определить  $K_{\text{СТУ}}$ ,  $\Gamma$  и  $\varphi$ .

Для измерения  $K_{\text{СТУ}}$  и  $\Gamma$  нет необходимости строить распределение поля, достаточно перемещать зонд вдоль линии и фиксировать максимальное  $U_{\text{МАКС}}$  и минимальное  $U_{\text{МИН}}$  показания индикатора. В соответствии с (3.41) ... (3.43) находим:

отраженной волн одинаковы, т.е. напряженности суммируются, поэтому

$$E_{\text{МАКС}} = E_{\Pi} + E_{\text{O}} = E_{\Pi}(1 + \Gamma). \quad (3.40)$$

Минимумы распределения поля располагаются там, где падающая и отраженная волны противофазны, т.е. напряженности вычитаются. Из этого следует, что

$$E_{\text{МИН}} = E_{\Pi} - E_{\text{O}} = E_{\Pi}(1 - \Gamma). \quad (3.41)$$

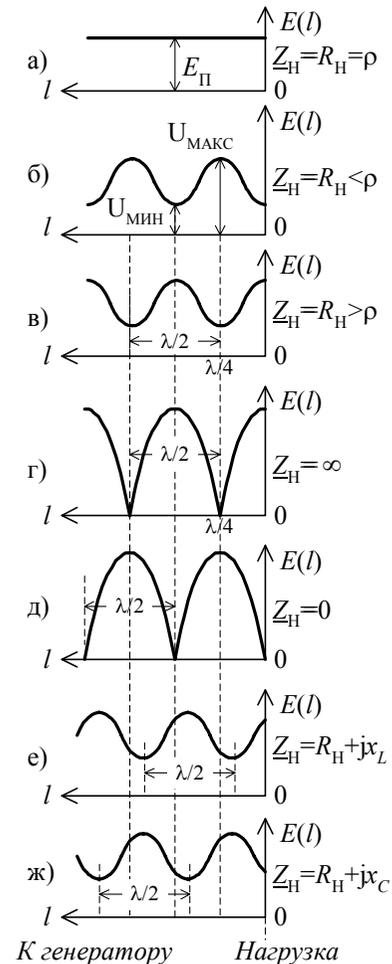


Рисунок 3.11 — Распределение напряженности поля при различных  $Z_{\text{H}}$

Расстояние между соседними максимумами и минимумами распределения напряженности поля равно четверти длины волны  $\lambda/4$  в линии. Положение экстремумов распределения напряженности поля в линии зависит от сопротивления  $Z_{\text{H}}$  нагрузки.

В случае реактивной нагрузки ( $Z_{\text{H}} = jx$ ), в режиме холостого хода ( $Z_{\text{H}} = \infty$ ) или короткого замыкания ( $Z_{\text{H}} = 0$ ) линии амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей волны, что соответствует  $\Gamma=1$  (рисунки 3.11, г и 3.11, д). Такой режим работы линии называют режимом стоячей волны.

Таким образом, по распределению напряженности поля можно судить о сопротивлении нагрузки и степени ее согласования с волновым сопротивлением линии передачи.

### 3.4.2. Метод измерительной линии

Одним из основных методов измерения параметров микроволновых цепей является метод измерительной линии. Он основан на исследовании распределение напряженности поля вдоль линии передачи. Изме-

большее число ряда. Так, если в результате испытаний определено значение  $\delta_{\text{ПМ}}=0,52$ , то в качестве класса точности выбирают число  $\mu=1,0$ . Класс точности может указываться как для отдельных пределов измерений, так и для их групп или прибора в целом. Во всех случае класс точности присваивают, исходя из наибольшего значения  $\delta_{\text{ПМ}}$ .

### 3.2.1. Характеристики переменных напряжений

Периодические переменные токи и напряжения характеризуют мгновенным, пиковым, действующим (среднеквадратическим) и средним значениями. Примеры графиков периодических напряжений показаны на рисунке 3.1.

Мгновенные значения  $u(t)$  переменных напряжений определяют для каждого конкретного момента времени  $t$ . В простейшем случае это делают с помощью осциллографа, позволяющего определить по осциллограмме мгновенное значение колебания в интересующий момент времени.

Пиковым значением напряжения  $U_m$  или амплитудой, если речь идет о гармонических колебаниях, принято называть наибольшее значение модуля периодического колебания за период. Если напряжение в течение периода изменяет знак и форма напряжения несимметрична, то различают положительное  $U_{m1}$  и отрицательное  $U_{m2}$  пиковые значения. Сумму этих пиковых значений называют размахом напряжения  $U_p = U_{m1} + U_{m2}$  (рисунок 3.1). Для гармонических колебаний  $U_p = 2U_m$ .

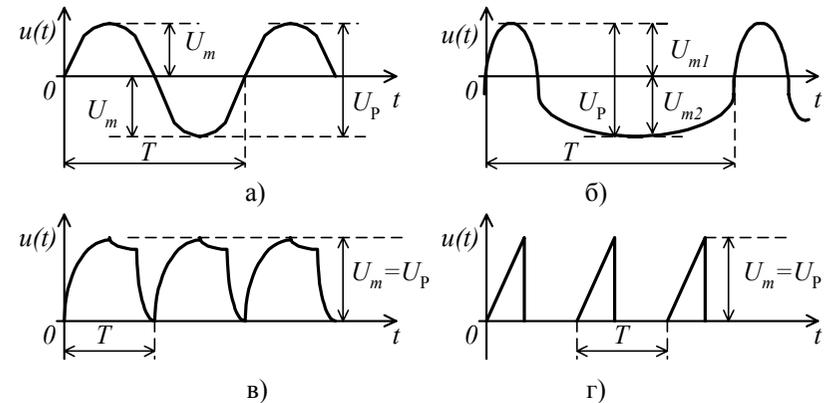


Рисунок 3.1 — Примеры периодических напряжений

Среднее значение периодического напряжения  $u(t)$  за период  $T$ , которое называют также постоянной составляющей напряжения  $u(t)$ , определяют как

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt. \quad (3.4)$$

На рисунке 3.2 показаны два напряжения, имеющие одинаковую форму и размах, но различные средние значения.

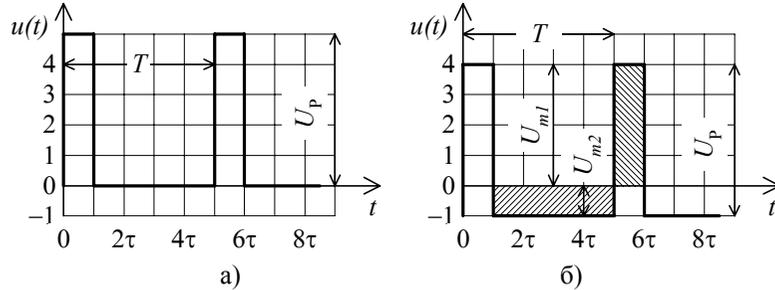


Рисунок 3.2 — Напряжения с постоянной составляющей (а) и без постоянной составляющей(б)

Среднее значение первого напряжения (рисунок 3.2, а) находим по формуле

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^\tau U_p dt = \frac{U_p}{T} \tau. \quad (3.5)$$

Среднее значение второго напряжения (рисунок 3.2, б)

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^\tau U_{m1} dt - \frac{1}{T} \int_\tau^{5\tau} U_{m2} dt = \frac{U_{m1}}{T} \tau - \frac{U_{m1}}{4\tau} 4\tau = 0$$

равно нулю, так как площадь положительной части колебания равна площади отрицательной части.

Среднее значение напряжения измеряют вольтметром постоянного тока. В силу своей инерционности, он реагирует только на среднее значение процесса, т.е. на постоянную составляющую.

Средневыпрямленное значение (СВЗ) напряжения — это среднее значение модуля напряжения за период колебания

$\Psi_0(l)$  — начальные фазы падающей и отраженной волн на расстоянии  $l$  от нагрузки.

Таким образом, в линии передачи результирующая амплитуда  $E$  напряженности поля определяется векторной суммой двух волн, имеющих одинаковую частоту, но разные амплитуды и фазы. При этом начальные фазы падающей и отраженной волн изменяется по длине линии. Вследствие этого возникает неравномерное распределение  $E$  по длине линии:

$$E = \sqrt{E_{\Pi}^2 + E_0^2 + 2E_{\Pi}E_0 \cos(\Psi_{\Pi} - \Psi_0 + 2\beta l)}. \quad (3.37)$$

Режим работы линии передачи зависит от соотношения сопротивления  $Z_H$  нагрузки и волнового сопротивления  $Z_B = \rho$  линии передачи. В качестве характеристик нагрузок используют комплексный коэффициент отражения  $\Gamma$  и коэффициент стоячей волны  $K_{CTU}$ , определяемые следующими выражениями:

$$\Gamma = \frac{\dot{E}_0}{\dot{E}_{\Pi}} = \frac{E_0}{E_{\Pi}} e^{j\varphi} = \frac{Z_B - Z_H}{Z_B + Z_H} = \Gamma e^{j\varphi}, \quad (3.38)$$

$$K_{CTU} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}, \quad (3.39)$$

где  $\dot{E}_{\Pi} = E_{\Pi} e^{j\Psi_{\Pi}}$ ,  $\dot{E}_0 = E_0 e^{j\Psi_0}$  — комплексные амплитуды падающей и отраженной волн в плоскости подключения нагрузки соответственно,  $\varphi = \Psi_0 - \Psi_{\Pi}$ ;  $\Gamma = |\Gamma|$  — аргумент (фаза) и модуль комплексного коэффициента отражения нагрузки соответственно.

В зависимости от  $Z_H$  модуль комплексного коэффициента отражения может принимать значение от 0 до 1, а  $K_{CTU}$  — от единицы до бесконечности. На рисунке 3.11 показано распределение напряженности поля  $E$  вдоль линии передачи при различных сопротивлениях нагрузки.

При согласованной нагрузке ( $Z_H = \rho$ ) напряженность поля в линии с малыми потерями распределена равномерно (рисунок 3.11, а), поскольку вся мощность падающей волны поглощается нагрузкой ( $\Gamma=0$ ) и в линии отсутствует отраженная волна. Такой режим работы линии называют режимом бегущей волны.

При  $Z_H \neq \rho$  распределение поля в линии становится неравномерным, появляются максимумы и минимумы напряженности поля. Максимумы распределения поля располагаются в сечениях линии, где фазы падающей и

сопротивление линии  $Z_B$  и постоянную распространения  $\gamma=\alpha+j\beta$ . Коэффициент затухания  $\alpha$  характеризует потери, а фазовая постоянная  $\beta$  — изменение фазы электромагнитной волны при прохождении единицы длины линии.

Для линий передачи с малыми потерями волновое сопротивление линии  $Z_B=r$  можно считать активным, а также принять:  $\alpha=0$ ;  $\beta=2\pi/\lambda$ , где  $\lambda$  — длина электромагнитной волны в линии [1, 2, 4, 9]. Электрическую составляющую электромагнитной волны, распространяющейся в линии передачи с малыми потерями, можно представить в виде

$$E(t) = E_m \cos(\omega t - \beta x + \Psi), \quad (3.34)$$

где  $E_m$ ,  $\Psi$  — амплитуда и начальная фаза напряженности поля на входе линии;  $\omega$  — круговая частота;  $x$  — расстояние от входа линии до точки наблюдения.

В общем случае в линии передачи, соединяющей генератор микроволновых колебаний с нагрузкой (рисунок 3.10), могут одновременно распространяться две волны: падающая — от генератора к нагрузке и отраженная волна — от нагрузки к генератору.

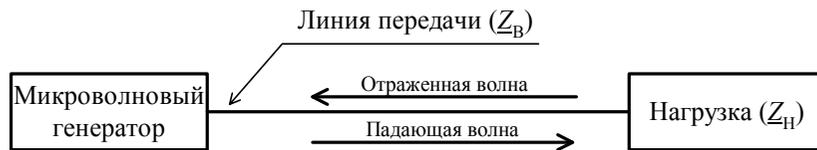


Рисунок 3.10 — Подключение нагрузки к генератору

При сопротивлении нагрузки  $Z_H \neq Z_B$ , падающая волна поглощается нагрузкой не полностью и частично отражается в сторону генератора. Если отсчитывать расстояние  $l$  вдоль линии от нагрузки в сторону генератора, то падающую  $E_{\Pi}(t)$  и отраженную  $E_{O}(t)$  волны можно представить в виде:

$$E_{\Pi}(t) = E_{\Pi} \cos[\omega t + \Psi_{\Pi}(l)] = E_{\Pi} \cos(\omega t + \beta l + \Psi_{\Pi}), \quad (3.35)$$

$$E_{O}(t) = E_{O} \cos(\omega t + \Psi_{O}(l)) = E_{O} \cos(\omega t - \beta l + \Psi_{O}), \quad (3.36)$$

где  $E_{\Pi}$ ,  $E_{O}$  — амплитуды напряженности поля падающей и отраженной волн в плоскости подключения нагрузки ( $l=0$ ) соответственно;  $\Psi_{\Pi}$ ,  $\Psi_{O}$  — начальные фазы падающей и отраженной волн в плоскости нагрузки;  $\Psi_{\Pi}(l)$ ,

$$U_{CB} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt. \quad (3.6)$$

На рисунке 3.3 показаны примеры графиков напряжений и их модулей.

Для вычисления средневыпрямленного значения гармонического напряжения  $u(t)=U_m \sin(\omega t)$  воспользуемся выражением (3.6)

$$U_{CB} = \frac{1}{T} \int_0^T |U_m \sin(\omega t)| dt = \frac{2U_m}{T} \int_0^{T/2} \sin(\omega t) dt = \frac{4U_m}{T} \int_0^{T/4} \sin(\omega t) dt \approx 0,637U_m.$$

Для всех однополярных напряжений средневыпрямленное значение равно модулю среднего значения или модулю постоянной составляющей.

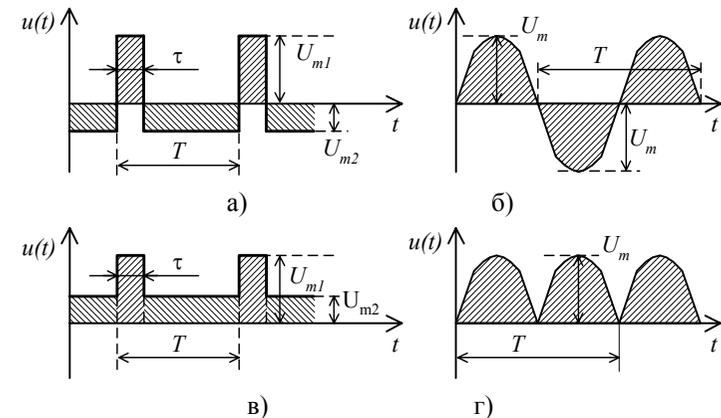


Рисунок 3.3 — Графики напряжений (а, б) и их модулей (в, г)

Действующее или среднеквадратическое значение (СКЗ) напряжения  $U$  за период определяют по формуле

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (3.7)$$

Действующее значение гармонического напряжения (СКЗ)

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2(\omega t) dt} = \sqrt{\frac{U_m^2}{2T} \int_0^T [1 - \cos(2\omega t)] dt} =$$

$$= \sqrt{\frac{U_m^2}{2T} \int_0^T dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.8)$$

Действующее значение периодического напряжения сложной формы, разложенного в ряд Фурье равно корню квадратному из суммы квадратов действующих значений всех спектральных составляющих.

Связь между пиковым, действующим и средневыпрямленным значениями напряжения заданной формы устанавливают при помощи коэффициента формы и коэффициента амплитуды.

*Коэффициент амплитуды* равен отношению амплитудного (пикового) значения напряжения к действующему значению

$$K_A = U_m / U = \frac{U_p}{2U}. \quad (3.9)$$

*Коэффициент формы* равен отношению действующего значения напряжения к средневыпрямленному значению

$$K_\Phi = U / U_{CB}. \quad (3.10)$$

В случае гармонического напряжения коэффициенты имеют следующие значения:

$$K_{AG} = \frac{U_m}{U} = \sqrt{2} \approx 1,41; \quad (3.11)$$

$$K_{\Phi G} = \frac{U}{U_{CB}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} / \frac{2U_m}{\pi} \approx 1,11. \quad (3.12)$$

Таким образом, знание формы напряжения позволяет вычислить коэффициенты формы и амплитуды, что дает возможность по результатам измерения одного значения напряжения определить другое.

После преобразований получаем

$$R_1 R_2 + j\omega C_1 R_3 R_1 R_2 = R_3 r_{L\Delta} - j\omega L_\Delta R_3, \quad (3.30)$$

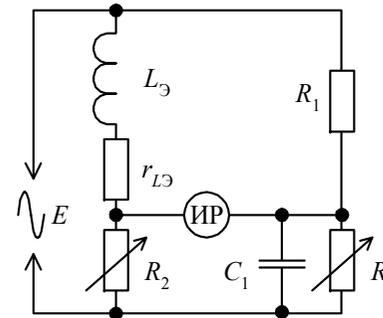


Рисунок 3.9 — Мост для измерения индуктивности

Приравнявая мнимые и действительные части (3.30), находим:

$$L_\Delta = C_1 R_1 R_2; \quad (3.31)$$

$$r_{L\Delta} = \frac{R_1 R_2}{R_3}. \quad (3.32)$$

Из полученных выражений следует, что значения индуктивности  $L_\Delta$  и сопротивления потерь  $r_{L\Delta}$  можно определить по известным параметрам элементов моста.

При помощи рассмотренного моста можно также измерить добротность катушки индуктивности. Используя выражения (3.13), (3.31) и (3.32), получаем

$$Q = \omega C_1 R_3. \quad (3.33)$$

Основная погрешность при использовании мостовых схем включает в себя: погрешность значений параметров образцовых элементов моста; погрешность, обусловленную неточностью балансировки моста, которая определяется чувствительностью индикатора; погрешность, обусловленную паразитным сопротивлением, емкостью и индуктивностью соединительных проводов и переходных сопротивлений контактов, а также паразитными связями между элементами моста.

Четырехплечные мосты могут применяться как на постоянном токе, так и на переменном токе вплоть до 400 МГц.

## 3.4. Измерение параметров микроволновых цепей

### 3.4.1. Измеряемые величины

Первичными параметрами цепей (линий передачи) с распределенными постоянными принято считать емкость, индуктивность, сопротивление и проводимость, приходящиеся на единицу длины. В практике измерений используют более удобные для измерения вторичные параметры: волновое

$$R_2 r_C = R_3 R_1; \quad (3.24)$$

$$\frac{R_2}{C_3} = \frac{R_1}{C_1}. \quad (3.25)$$

Выразим измеряемые величины через известные параметры моста:

$$C_3 = C_1 \frac{R_2}{R_1}; \quad (3.26)$$

$$r_C = R_3 \frac{R_1}{R_2}. \quad (3.27)$$

Из полученных выражений следует, что значения емкости  $C_3$  и сопротивления потерь  $r_C$  можно определить по известным параметрам элементов моста.

С помощью рассматриваемого моста можно измерить тангенс угла потерь конденсатора  $\operatorname{tg} \delta$ . В соответствии с (3.17), (3.26) и (3.27) находим

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q_C} = \frac{1}{\omega C_1 R_3}. \quad (3.28)$$

Из (3.28) следует, что при постоянных  $\omega$  и  $C_1$  шкалу переменного сопротивления  $R_3$  можно проградуировать непосредственно в значениях тангенса угла потерь конденсатора.

### 3.3.4. Измерение индуктивности

На рисунке 3.9 показана схема моста с двойной регулировкой для измерения индуктивности.

В соответствии с выражением (3.20) условие равновесия моста представим в виде

$$R_1 \cdot R_2 = \frac{(r_{L3} + j\omega L_3) \frac{R_3}{j\omega C_1}}{\left( \frac{1}{j\omega C_1} + R_3 \right)}. \quad (3.29)$$

### 3.2.2. Влияние формы периодических напряжений на показания вольтметров

Промышленные приборы для измерения напряжений, согласно принятой системе обозначения, образуют подгруппу «В» приборов для измерения напряжения. Эта подгруппа содержит [1, 2]:

- V1 — приборы и установки для поверки вольтметров;
- V2 — вольтметры постоянного тока;
- V3 — вольтметры переменного тока;
- V4 — вольтметры импульсного тока;
- V5 — вольтметры фазочувствительные;
- V6 — вольтметры селективные;
- V7 — вольтметры универсальные;
- V8 — измерители отношения напряжений и (или) разности напряжений;
- V9 — преобразователи напряжений.

Упрощенные структурные схемы электронных вольтметров переменного тока типа V3 показаны на рисунке 3.4 [1, 6, 10]. В вольтметрах этого типа входное переменное напряжение преобразуется в постоянное напряжение, которое через согласующий каскад поступает на индикаторное устройство, представляющее собой вольтметр постоянного тока.



Рисунок 3.4 — Упрощенные структурные схемы электронных вольтметров

В зависимости от вида преобразователя переменного напряжения в постоянное напряжение, выходное напряжение преобразователя может

быть пропорционально амплитудному (пиковому), средневыпрямленному, действующему значениям исследуемого переменного напряжения  $u(t)$ . Соответственно, вольтметры переменного тока разделяют на амплитудные (пиковые), вольтметры средневыпрямленных значений, вольтметры действующих значений.

Все вольтметры переменного тока (ВЗ) проградуированы в действующих значениях (СКЗ) гармонического (синусоидального) напряжения. То есть, при подключении указанных вольтметров к источнику гармонического напряжения показания вольтметров равны действующему значению входного напряжения. Это достигается соответствующим выбором коэффициента передачи  $K_{СК}$  согласующего каскада, включенного между преобразователем и вольтметром постоянного тока.

В большинстве случаев электронные вольтметры переменного тока имеют закрытый вход, т.е. на входе вольтметра установлен разделительный конденсатор, делающий его нечувствительным к постоянной составляющей входного напряжения. При поступлении на вход исследуемого напряжения, содержащего постоянную и переменную составляющие, вольтметр будет реагировать только на переменную составляющую входного напряжения.

При работе с электронным вольтметром типа ВЗ возникают два вопроса. Во первых, как измерить средневыпрямленное и амплитудное значения гармонического напряжения? Во вторых, как измерить значения переменного напряжения негармонической формы?

Для ответа на первый вопрос необходимо знать тип вольтметра (тип преобразователя), а также коэффициенты амплитуды (3.11) и формы (3.12) гармонического напряжения. Например, на вход амплитудного вольтметра значений (рисунок 3.4, а) поступает гармоническое напряжение, и при этом вольтметр показывает напряжение  $U_B=3$  В. Тогда, на основании (3.11) и (3.12) находим:

$$U_m = K_{АГ} U_B = \sqrt{2} \cdot 3 \approx 1,41 \cdot 3 = 4,23 \text{ В};$$

$$U_{СВ} = \frac{U_B}{K_{ФГ}} = \frac{3}{1,11} \approx 3 \cdot 0,9 = 2,7 \text{ В}.$$

При ответе на второй вопрос следует помнить, что фактически измеряемое вольтметром значение напряжения определяется типом преобразователя переменного напряжения в постоянное. Если в вольтметре преобразователь пиковых значений, то *вольтметр измеряет пиковые значения при любой форме периодического напряжения, но проградуирован в действующих значениях (СКЗ) гармонического (синусоидального) напряжения*. Поэтому, если цифры шкалы пикового вольтметра умножить на коэффициент амплитуды гармонического напряжения  $K_{АГ}=1,41$ , получим градуировку

числа равны в том случае, если равны их действительные и мнимые части. Поэтому, при равновесии моста переменного тока выполняются условия:

$$\text{Im}(Z_1 Z_3) = \text{Im}(Z_2 Z_3); \quad (3.21)$$

$$\text{Re}(Z_1 Z_3) = \text{Im}(Z_2 Z_3). \quad (3.22)$$

Данные соотношения позволяют однозначно связать параметры исследуемого элемента с известными параметрами элементов, установленных в остальных плечах моста.

### 3.3.3. Измерение емкости

Обычно реальный конденсатор представляют эквивалентной схемой в виде последовательного соединения измеряемых емкости  $C_3$  и сопротивления потерь  $r_C$ . В практике измерения параметров конденсаторов наибольшее распространение получила схема моста с двойной регулировкой, показанная на рисунке 3.8. Плечи моста содержат два регулируемых сопротивления, предназначенные для балансировки моста. Минимум показаний индикатора соответствует равновесию моста, которого добиваются последовательным изменением  $R_2$  и  $R_3$ .

В соответствии с (3.20), условие равновесия моста, представленное в комплексной форме, имеет вид

$$\left( r_C + \frac{1}{j\omega C_3} \right) R_2 = \left( R_3 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) R_1, \quad (3.23)$$

где  $\omega$  — круговая частота напряжения питания моста.

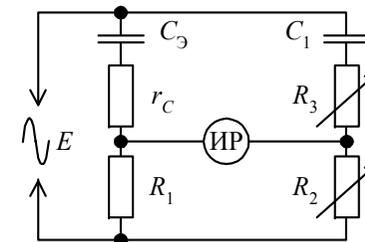


Рисунок 3.8 — Мост для измерения емкости

Приравнивая мнимые и действительные части выражения, получаем:

### 3.3.2. Мосты переменного тока

Для измерения параметров резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов часто применяют мост переменного тока [4, 5, 6]. На рисунке 3.7 представлена обобщенная эквивалентная схема моста переменного тока.

Плечи моста образованы комплексными сопротивлениями.  $\underline{Z}_i = |\underline{Z}_i| \cdot e^{j\Phi_i}$ , где  $\Phi_i = \arctg(X_i / R_i)$  — аргумент комплексного сопротивления;  $R_i$ ,  $X_i$  — действительная и мнимая части сопротивления соответственно;  $|\underline{Z}_i|$  — модуль комплексного сопротивления, где  $i=1, 2, 3, 4$ .

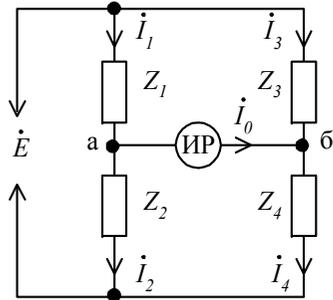


Рисунок 3.7 — Эквивалентная схема моста переменного тока

В качестве сопротивления одного из плеч моста, например  $\underline{Z}_1$ , устанавливают исследуемый элемент (катушку индуктивности, конденсатор, резистор), а остальные плечи моста формируют из элементов с известными параметрами.

Переменное напряжение  $\dot{E}$  питают на одну диагональ моста, а к другой диагонали моста подключают индикатор равновесия (ИР). Питание мостов обычно осуществляют напряжением низкой частоты, так как при этом влияние паразитных емкостей и индуктивностей мало сказывается на точности измерения.

В простейших мостах в качестве индикатора равновесия моста используют телефон, а в более точных — высокочувствительные индикаторы переменного напряжения.

Мост считается уравновешенным (сбалансированным), если ток  $\dot{I}_0$  в его диагонали равен нулю, что соответствует нулевой разности напряжений между точками "а" и "б". Приравняв падения напряжений на комплексных сопротивлениях  $\underline{Z}_2$  и  $\underline{Z}_4$ , получаем

$$\dot{E} \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \dot{E} \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4}. \quad (3.19)$$

Преобразуя (3.19), находим условие равновесия моста

$$\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3. \quad (3.20)$$

Таким образом, при равновесии моста произведения комплексных сопротивлений противоположных плеч равны. Как известно, комплексные

шкалы в пиковых значениях, справедливую при любой форме напряжения.

В случае преобразователя средневыпрямленных значений — вольтметр фактически измеряет средневыпрямленное значение независимо от формы входного напряжения, но проградуирован в действующих значениях (СКЗ) гармонического (синусоидального) напряжения. Следовательно, чтобы получить средневыпрямленные значения, надо показания прибора умножить на коэффициент  $1/K_{ФГ}=0,9$ .

Теперь рассмотрим вопрос о коррекции показаний вольтметра для получения различных значений напряжения при негармоническом напряжении в случае известных  $K_A$  и  $K_{Ф}$ . Сначала надо выяснить то значение напряжения, которое вольтметр фактически измеряет. Если имеем вольтметр средневыпрямленных значений, то, умножая его показания на  $1/K_{ФГ}=0,9$ , находим СВЗ исследуемого напряжения независимо от формы напряжения. Далее, умножая СВЗ на  $K_{Ф}$ , получим действующее значение (СКЗ) исследуемого напряжения. Если теперь полученное действующее значение умножить на  $K_A$ , то найдем пиковое значение исследуемого напряжения. Таким образом, зная тип вольтметра, а также  $K_A$  и  $K_{Ф}$  исследуемого напряжения, можно найти пиковое (амплитудное), действующее и средневыпрямленное значения напряжения.

Амплитудные вольтметры обладают наибольшим диапазоном частот, от десятков герц до 1 ГГц. Основная погрешность на частотах до 30 МГц составляет 4 ... 6 %, на частотах до 1 ГГц — 25 %.

Вольтметры СКЗ обеспечивают измерение напряжения от единиц милливольт до сотен вольт в диапазоне частот 20 Гц ... 50 МГц с основной погрешностью 2,5 ... 10 %.

Вольтметры СВЗ обеспечивают измерение напряжений от десятых долей милливольт до сотен вольт в диапазоне частот от 20 Гц до 10 МГц. Основная погрешность составляет 2,5 ... 10 %.

## 3.3. Измерение параметров конденсаторов и катушек индуктивности

### 3.3.1. Измеряемые величины

Резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности, предназначенные для реализации электрических цепей, кроме основных параметров, таких как сопротивление, емкость, индуктивность, характеризуются рядом дополнительных параметров. Так, выводы резисторов и конденсаторов обладают индуктивностью, которая проявляется на достаточно высоких частотах, а катушки индуктивности всегда обладают межвитковой емкостью. Поэтому, для более точного описания свойств реальных элементов цепей используют эквивалентные схемы их замещения, учитывающие основные и дополнительные параметры.

На рисунке 3.5, а изображена эквивалентная схема катушки индук-

тивности [1, 2, 3].

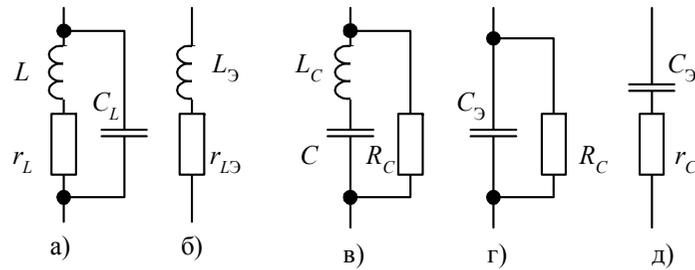


Рисунок 3.5 — Эквивалентные схемы катушки индуктивности (а, б) и конденсатора (в, г, д)

Основным параметром катушки индуктивности является собственная индуктивность  $L$ , а дополнительными (паразитными): сопротивление потерь  $r_L$  и собственная емкость  $C_L$ . Сопротивление потерь  $r_L$  обусловлено омическими потерями энергии в проводе, в экране и сердечнике катушки индуктивности. Собственная емкость катушки индуктивности  $C_L$  учитывает емкость между отдельными витками, между витками катушки и экраном и т.д. Катушки индуктивности часто характеризуют добротностью на частоте  $f$ , показывающей во сколько раз индуктивное сопротивление больше сопротивления потерь

$$Q_L = \frac{\omega L}{r_L}, \quad (3.13)$$

и собственной резонансной частотой

$$\omega_{0L} = \frac{1}{\sqrt{LC_L}}. \quad (3.14)$$

Обычно катушки индуктивности применяют на частотах существенно ниже резонансной и используют упрощенную эквивалентную схему катушки индуктивности. Она включает эквивалентные индуктивность  $L_Э$  и сопротивление потерь  $r_{LЭ}$  (рисунок 3.5, б). Большинство методов измерения дают значения именно эквивалентных параметров катушки индуктивности. Если рабочая частота катушки индуктивности, менее  $0,1\omega_{0L}$ , то с погрешностью менее 1 % можно считать, что  $L_Э=L$  и  $r_{LЭ}=r_L$ .

Эквивалентная схема конденсатора показана на рисунке 3.5, в. Паразитными параметрами конденсаторов являются сопротивление  $R_C$  потерь, обусловленное диэлектрическими потерями, и индуктивность  $L_C$  выводов и

обкладок конденсаторов. Конденсаторы можно характеризовать собственной резонансной частотой  $\omega_{0C} = 1/\sqrt{L_C C}$ . На частотах  $\omega \ll \omega_{0C}$  конденсатор обычно представляют параллельной (рисунок 3.5, г) или последовательной (рисунок 3.5, д) эквивалентными схемами, параметры которых связаны выражениями:

$$C_Э = \frac{C}{1 - \omega^2/\omega_{0C}^2}, \quad (3.15)$$

$$r_C = \frac{1}{(\omega C)^2 R_C}. \quad (3.16)$$

На рисунке 3.6 изображена векторная диаграмма тока и напряжений для схемы замещения конденсатора (рисунок 3.5, д).

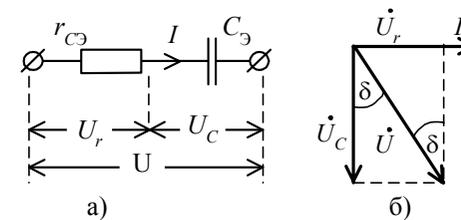


Рисунок 3.6 — Схема замещения конденсатора (а) и векторная диаграмма напряжений (б)

Конденсаторы также характеризуют добротностью

$$Q_C = \frac{U_r}{U_C} = \omega C r_C \quad (3.17)$$

или тангенсом угла потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q_C} = \frac{1}{\omega C_Э r_C}. \quad (3.18)$$

Параметры  $Q_C$  и  $\operatorname{tg} \delta$  зависят от рабочей частоты и используются для оценки работоспособности конденсатора в требуемом частотном диапазоне.