МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть 1

Методические указания к лабораторным работам



Рязань 2015

УДК 621.311

Теоретические основы электротехники. Часть 1: методические указания к лабораторным работам/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: А.П. Борисовский, А.А. Дягилев, С.А. Круглов, Е.В. Мамонтов, А.А.Сережин. Рязань, 2015. 92 с.

Содержат сведения по изучению, расчету и анализу режимов работы основных элементов и схем электротехники.

Предназначены для студентов направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», изучающих дисциплину «Теоретические основы электротехники».

Ил. 83. Табл. 24. Библиогр.: 14 назв.

Элементы электрических схем, измерение электрических величин, источники ЭДС, источники тока, методы расчёта электрических схем, переменный ток, представление переменных токов и напряжений с помощью векторных и топографических диаграмм, резонанс напряжений, резонанс токов, магнитносвязанные катушки, трансформатор

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра промышленной электроники РГРТУ (зав. кафедрой проф. В.С. Гуров)

Лабораторная работа № 1

ЭЛЕМЕНТЫ И ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Цель работы – изучение принципов работы приборов, используемых в лабораторном практикуме, получение практических навыков по их применению, изучение основных элементов и законов электрических цепей.

1. Общие сведения

i

Электрической цепью называется совокупность элементов, по которым протекает электрический ток. Элементами электрических цепей являются источники электрической энергии, устройства для ее передачи и приемники этой энергии. Источники преобразуют другие виды энергии в электрическую. Передача электрической энергии происходит по соединительным линиям.

В приемниках (нагрузках) происходит преобразование электрической энергии в другие виды энергии. Элементы электрических цепей делятся на активные (источники напряжения и тока) и пассивные (сопротивления, индуктивности и емкости).

Электрический ток как упорядоченное движение электрических зарядов характеризуется направлением. За положительное направление тока принято направление движения положительных зарядов. Положительные направления тока и напряжения на схемах электрических цепей изображают стрелками (рис. 1. 1).

В электротехнике различают постоянный и переменный токи (рис. 1. 2). Постоянным называется ток, амплитуда и направление которого не изменяются со временем (рис. 1. 2, а), I=const. Переменный ток характеризуется мгновенным значением i(t), которое определяется в каждый момент времени. На

рутельное направлериние напряжения и тока на элементах

Рис. 1. 1. Положи-



Рис. 1. 2. Временные диаграммы постоянного (а), переменного синусоидального (б) и переменного импульсного (в) токов

рис. 1. 2, б изображен переменный синусоидальный ток, который описывается законом $i(t)=I_m \cdot sin\omega t$, где I_m – амплитуда тока, T – период изменения тока, $\omega=2\pi/T$ – циклическая частота изменения тока. На рис. 1. 2, в изображен переменный импульсный ток, который описывается законом

$$i(t) = \begin{cases} I_m, 0 < t \le t_u \\ -I_m, t_u < t \le T \end{cases}$$

где I_m – амплитуда тока, T – период изменения тока, t_u – длительность импульса тока.



Рис. 1. 3. Примеры ВАХ линейных (а) и нелинейного (б) элементов

Элементы электрических цепей можно описать с помощью вольтамперной характеристики (BAX). BAX – зависимость величины протекающего через элемент тока от приложенного к нему напряжения. В электротехнике различают элементы с линейной (рис. 1. 3, а) и нелинейной (рис. 1. 3, б) BAX.

Если электрическая цепь состоит из линейных элементов, то она называется линейной. Для линейных цепей применим принцип суперпозиции. Согласно ему реакция цепи на сумму воздействий равна сумме реакций на каждое воздействие.

Если в электрической цепи есть хотя бы один нелинейный элемент, то вся цепь называется нелинейной. Для такой цепи принцип суперпозиции неприменим.

При протекании электрического тока переносится энергия, скорость изменения этой энергии характеризуется мгновенной мощностью:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t). \tag{1.1}$$

Мгновенная мощность измеряется в ваттах (Вт) и имеет знак. При p>0 энергия источника расходуется, а при p<0 она возвращается к источнику. Энергия, поступившая в приемник за интервал времени от 0 до T, выражается интегралом:

$$W = \int_{0}^{T} p(t)dt \,. \tag{1.2}$$

1.1. Приемники электрической энергии

Сопротивление. Условно-графическое изображение сопротивления (также называемого резистором) приведено на рис. 1.4. На схеме обозначается буквой R, единица измерения – ом [Ом].



графическое обозначение сопротивления

Величина, обратная сопротивлению q=1/R, называется проводимостью – единица измерения–

сименс [См].Свойства пассивных элементов электрических цепей определяются характером связи между протекающим через них током и действующим на них напряжением.

Для сопротивления эта связь выражается законом Ома для однородного участка цепи:

$$u_R(t) = R \cdot i_R(t). \tag{1.3}$$

В соответствии с законом Ома напряжение и ток имеют одинаковый знак, и поэтому мгновенная мощность, рассеиваемая на сопротивлении, всегда положительная:

$$p_{R}(t) = u_{R}(t) \cdot i_{R}(t) = R \cdot i_{R}^{2}(t) = u_{R}^{2}(t)/R.$$
(1.4)

Это означает, что в сопротивлении происходит преобразование электрической энергии в тепловую. За время от 0 до Т в сопротивлении выделяется энергия:

$$W_{R} = R \int_{0}^{T} i^{2}(t) dt = \frac{1}{R} \int_{0}^{T} u^{2}(t) dt.$$
(1.5)

Для постоянного тока i(t) = I = const, поэтому из (1.5) имеем:

$$W_R = I \cdot U \cdot R = RI^2 T = U^2 T/R.$$
(1.6)

Индуктивность. Условно графическое изображение индуктивности приведено на рис. 1. 5. На схеме обозначается буквой L, единица измерения – генри [Гн].

Связь между мгновенными значениями тока и напряжения для индуктивности устанавливается законом Фарадея:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt}$$
или $i_L(t) = \frac{l}{L} \int u_L dt$. (1.7)

Мгновенная мощность, поступающая в индуктивность, определяется выражением:

$$p_L(t) = u_L(t) \cdot i_L(t) = L \cdot i_L(t) \frac{di_L}{dt}.$$
 (1.8)

Так как ток и его производная могут иметь одинаковые или разные знаки, мгновенная мощность p_L может быть как положительной, так и отрицательной. При $p_L>0$ происходит накопление энергии в магнитном поле индуктивности, при $p_L<0$ энергия возвра-



Рис. 1. 5. Условнографическое обозначение индуктивности

щается источнику. Энергия магнитного поля в момент времени *T* определяется по формуле:

$$W_{L} = L \int_{0}^{T} i_{L}(t) \cdot \frac{di_{L}}{dt} dt = L \int_{0}^{T} i_{L}(t) di_{L} = \frac{Li_{L}^{2}}{2}.$$
 (1.9)



Рис. 1. 6. Условнографическое обозначение емкости

Емкость. Условно-графическое изображение емкости (также называемой конденсатором) приведено на рис. 1. 6. На схеме обозначается буквой С, единица измерения – фарад [Ф].

Для емкости связь между током и напряжением устанавливается через выражение

$$u_C = \frac{q(t)}{C},\tag{1.10}$$

где $q(t) = \int_{0}^{t} i_{C} dt$ – запасенный в конденсаторе заряд за время протекания через него тока $i_{C}(t)$. Отсюда:

 $u_{C}(t) = \frac{1}{C} \int_{0}^{t} i_{C}(t) dt$ или $i_{C}(t) = C \frac{du_{C}}{dt}$. (1.11)

Мгновенная мощность, поступающая в емкость, равна:

$$p_C(t) = u_C(t) \cdot i_C(t) = C \cdot u_C(t) \cdot \frac{du_C}{dt}.$$
(1.12)

При $p_C>0$ в электрическом поле конденсатора запасается энергия, а при $p_C<0$ энергия возвращается источнику. Энергия конденсатора рассчитывается по формуле

$$W_C = \frac{Cu_C^2}{2}.$$
 (1.13)

Так как в индуктивности и емкости энергия не расходуется, эти элементы называют реактивными.

1.2. Источники электрической энергии, соединительные линии

Ток в электрических цепях протекает от источников электрической энергии. Источники электрической энергии преобразуют другие виды энергии в электрическую. Различают источники тока и источники напряжения.

Источник напряжения (ЭДС). У идеального источника ЭДС напряжение не зависит от протекающего через него тока. Его ВАХ (вольт-амперная характеристика) представляет собой постоянную величину (рис. 1. 7, б). У реальных источников ЭДС с изменением тока напряжение не остается постоянным (рис. 1. 7, г). В эквивалентной схеме источника ЭДС это отражается наличием элемента R_i , называемого внутренним сопротивлением. Величина R_i может быть определена по ВАХ (рис. 1. 7, г)



Рис. 1. 7. Эквивалентная схема (а) и ВАХ (б) идеального источника ЭДС, эквивалентная схема (в) и ВАХ (г) реального источника ЭДС

$$R_i = \Delta U / \Delta I. \tag{1.14}$$

Для лучшего приближения источника ЭДС к идеальному его внутреннее сопротивление должно быть как можно меньше.

Источник тока – это активный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его выводах (рис. 1.8, б). Внутреннее сопротивление идеального источника тока – бесконечность. Реальный источник тока изображается в виде идеального с параллельным подключением к его выводам сопротивления R_i (рис. 1.8, в). Свойства реального источника тока приближаются к идеальному при увеличении сопротивления R_i .

Соединительные линии предназначены для подключения нагрузок к источникам энергии. В электротехнике условно принимают соединительные линии идеальными (рис. 1. 9, а). В этом случае сопротивление между точками, которые соединяет линия, равно нулю. Если в расчетах использовать реальные линии, то необходимо учитывать сопротивление потерь (рис. 1. 9, б).



эквивалентная схема (в) и ВАХ (г) реального источника тока



Рис. 1. 9. Идеальная (а) и реальная (б) соединительные линии



Рис. 1. 10. Пример электрической цепи

Для описания электрических цепей используют следующие понятия:

- ветвь участок цепи, по которому протекает один и тот же ток;
- узел место соединения 3 и более ветвей;
- *контур* замкнутый участок цепи, в который любая ветвь входит только один раз;
- независимый контур контур, который содержит хотя бы одну ветвь, не входящую в другие контура;
- цепь, состоящая из одной ветви, называется неразветвленной;
- цепь, содержащая источники электрической энергии, называется активной, не содержащая пассивной. Если источник энергии 1, то цепь называется простой, если 2 и больше сложной.

На рис. 1. 10 приведен пример сложной активной разветвленной электрической цепи. Представленная электрическая цепь имеет 6 ветвей и 4 узла. В ней можно выделить 7 контуров, из которых 3 независимых.

1.3. Измерения токов и напряжений

Измерение напряжений на элементах электрической цепи и протекающих через них *токов* производится вольтметрами и амперметрами соответственно (рис. 1. 11 а, в). Для измерения напряжения на участке цепи вольтметр подклю-



а б в г Рис. 1. 11. Графическое изображение идеального и реального вольтметра (а, б) и амперметра (в, г)

чается параллельно данному участку, а для измерения тока амперметр включается в цепь последовательно (рис. 1. 12). При этом показания вольтметра– $V=U_1+U_5=I_1R_1+I_5R_5$, а показания амперметра– $A=I_6$.

Чтобы не вносить искажений в режим работы электрической цепи, внутреннее сопротивление идеального вольтметра должно равняться бесконечности, а внутреннее сопротивление идеального амперметра – нулю. В реальности у вольтметра существует сопротивление утечки, которое на эквивалентной схеме подключается параллельно ему (рис. 1. 11, б), а у ампермет-



Рис. 1. 12. Пример подключения вольтметра и амперметра к электрической цепи

ра существует сопротивление потерь, которое на эквивалентной схеме подключается последовательно с ним (рис. 1. 11, г).

1.4. Законы Ома и Кирхгофа



Рис. 1. 13. Формы записи закона Ома: для участка цепи (а), для полной цепи (б), обобщенный закон Ома (в)

В электротехнике приняты три формы записи закона Ома:

- для участка цепи (рис. 1. 1 3, а) *I*=*U*/*R*;
- для полной цепи (рис. 1. 13, б) *I*=*E*/(*r*_{*i*}+*R*);
- обобщенный закон Ома (рис. 1. 13, в) *I*=(*E*-*U*)/*R*.

При расчетах электрических цепей наряду с зако-

ном Ома используют законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа определяет баланс токов в разветвленной цепи. Алгебраическая сумма токов в узле равна 0:

$$\sum_{k=l}^{n} i_k = 0.$$
 (1.15)

Обычно положительным выбирается направление тока, втекающего в узел. Для электрического узла, показанного на рис. 1. 14, первый закон Кирхгофа записывается в



Рис. 1. 14. Пример электрического узла





виде:

$$i_1 - i_2 - i_3 + i_4 = 0$$

Первый закон Кирхгофа основан на законе сохранения заряда и том факте, что в узле заряд не накапливается.

Второй закон Кирхгофа устанавливает баланс напряжений в замкнутом контуре. Алгебраическая сумма ЭДС в любом контуре цепи равна алгебраической сумме падений напряжения на элементах этого контура:

$$\sum_{k=1}^{n} e_{k} = \sum_{l=1}^{m} u_{l} .$$
 (1.16)

Обход контура совершается в произвольном направлении. Если ЭДС или падение напряжения на элементе совпадают с направлением обхода, они берутся с положительным знаком. Для примера на рис. 1. 15 второй закон Кирхгофа записывается в следующем виде:

$$e_1 - e_2 + e_3 = -u_{R1} + u_{R2} + u_{R3} - u_{R4} = -R_1 i_1 + R_2 i_2 + R_3 i_3 - R_4 i_4.$$

Законы Кирхгофа и Ома справедливы как для цепей постоянного, так и переменного тока.

Элементы электрических цепей могут соединяться различными способами. Чаще всего элементы соединяются последовательно, параллельно, звездой и треугольником. На рис. 1. 16 показано последовательное соединение резисторов, индуктивностей и емкостей.

При последовательном соединении через все элементы цепи течет одинаковый ток, а приложенное к цепи напряжение и, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, равно сумме падений напряжений на отдельных элементах.



Рис. 1. 16. Последовательное соединение резисторов (а), индуктивностей (б), емкостей (в) и их эквиваленты



Рис. 1. 17. Параллельное соединение резисторов (а), индуктивностей (б), емкостей (в) и их эквиваленты

Показанные на рис. 1. 16 цепи можно представить в виде одного общего элемента, значение которого рассчитывается по формулам:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \ L = L_1 + L_2 + \dots + L_n, \ \frac{l}{C} = \frac{l}{C_1} + \frac{l}{C_2} + \dots + \frac{l}{C_n}. \ (1.17)$$

В случае последовательного соединения двух емкостей выражение для расчета общей емкости будет иметь вид

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}.$$

Параллельное соединение элементов (рис. 1. 17) имеет место в случае, когда на всех элементах действует одинаковое напряжение.

Показанные на рис. 1. 17 цепи можно представить в виде одного общего элемента, значение которого рассчитывается по формулам:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}, \ \frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}, \ C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$
(1.18)

В случае параллельного соединения двух сопротивлений выражение для расчета общего сопротивления будет иметь вид

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \,.$$

На рис. 1. 18 представлены соединения «звездой» и «треугольником». Эти соединения можно тождественно преобразовать одно в другое. При этом значения сопротивлений, подключенных по схеме «звезда», рассчитываются из номиналов сопротивлений, включенных по



схеме «треугольник», по формулам

$$R_{1} = \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}}, R_{2} = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}}, R_{3} = \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}}.$$
 (1.19)

Обратное преобразование осуществляется с помощью выражений

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}, \ R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}, \ R_{13} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}.$$
(1.20)

2. Методика выполнения работы

Измерение сопротивлений, индуктивностей и емкостей, установленных на стенде (приложение 1), осуществляется мультиметром VC 9800⁺ (приложение 2). Выбор измеряемой величины и предел измерения осуществляется центральным переключателем. Выбранный предел измерения должен превышать номинальное значение элементов, указанное на стенде. При измерении сопротивлений измерительные щупы должны быть подключены в два крайних правых гнезда мультиметра, а при измерении индуктивностей и емкостей в два центральных гнезда мультиметра.

В отчете необходимо привести условно-графическое изображение каждого измеряемого элемента и комбинации измеряемых соединений элементов (последовательное и параллельное соединение). Напротив каждого условнографического изображения необходимо записать номинальное и измеренное значение исследуемого элемента или комбинации элементов.

При проведении измерений комплекта из 10 резисторов необходимо уточнить номинальное значение сопротивления у преподавателя.

Для проведения исследований сигналов различной формы необходимо использовать цифровой генератор напряжений специальной формы – GFG 3015 (приложение 3) и цифровой осциллограф АКИП 4115/3А (приложение 4). Первый канал осциллографа необходимо подключить к выводу источника ЭДС на лабораторном макете.

Тип исследуемого сигнала устанавливается на генераторе кнопкой «ФОРМА», а форма установленного сигнала отображается в виде пиктограммы в верхнем левом углу экрана генератора. Значение частоты, амплитуды, смещения и асимметрии исследуемого сигнала устанавливается с помощью цифровой клавиатуры при нажатии соответствующей кнопки («ЧАСТОТА», «АМПЛ», «СМЕЩ» или «АСИММ»). Фиксация установленного значения амплитуды и смещения осуществляется нажатием клавиши V_{pp}. Фиксация установленного значения установленного значения установленного значения установленного значения осуществляется нажатием клавиши %. Фиксация установленного значения частоты осуществляется нажатием клавиши Гц, кГц или МГц в зависимости от необходимого диапазона.

Стабилизация полученного на экране осциллографа сигнала осуществляется перемещением уровня синхронизации в область экрана осциллографа, занимаемую сигналом. Уровень синхронизации обозначен буквой Т и горизонтальной стрелкой в левой части экрана осциллографа. Если стрелка рядом с цифрой вертикальная, это значит, что уровень синхронизации находится за пределами экрана. Регулировка уровня синхронизации осуществляется ручкой «УРОВЕНЬ», находящейся в разделе синхронизации на лицевой панели осциллографа.

Нулевой уровень полученного на экране осциллографа сигнала необходимо совместить с центральной линией экрана. Нулевой уровень сигнала первого канала осциллографа обозначен цифрой 1 и горизонтальной стрелкой в левой части экрана осциллографа. Если стрелка рядом с цифрой вертикальная, это значит, что нулевой уровень сигнала находится за пределами экрана. Регулировка сигнала по вертикали осуществляется ручкой «СМЕЩЕНИЕ», находящейся в разделе вертикального управления на лицевой панели осциллографа.

После этого необходимо совместить выбранное начало сигнала с ближайшей точкой координатной сетки на экране осциллографа. Регулировка сигнала по вертикали осуществляется ручкой «СМЕЩЕНИЕ», находящейся в разделе горизонтального управления на лицевой панели осциллографа. Полученную осциллограмму зарисовать в отчет, указав на осях масштаб и размерность измеряемых величин. Текущий масштаб по осям отображается в нижней части экрана осциллографа. В отчете должно быть отображено не менее 2 периодов исследуемого сигнала.

Амплитудные значения напряжений сигналов различной формы измеряются осциллографом. Курсорами в режиме «НАПРЯЖЕНИЕ» отмечается минимальное и максимальное значения сигнала. Выбранный курсор перемещается с помощью ручки «УСТАНОВКА». Амплитудное значение напряжения для синусоидального, прямоугольного и треугольного сигналов определяется как:

$$U_m = \Delta U/2, \tag{1.21}$$

при этом значение ΔU отображается в верхнем левом углу экрана осциллографа. Для импульсного сигнала $U_m = \Delta U$.

Временные интервалы измеряются курсорами в режиме «ВРЕМЯ». Курсоры подводятся с помощью ручки «УСТАНОВКА» к началу и концу измеряемого участка. Значение временного интервала ΔT отображается в верхнем левом углу экрана осциллографа.

Перед выполнением работы необходимо составить отчет, который должен содержать краткие элементы теории, *все исследуемые схемы, таблицы и расчеты, указанные в программе работы.* Схемы и таблицы должны быть выполнены карандашом и в соответствии с требованиями ЕСКД.

Студент, не подготовивший отчет, к выполнению лабораторной работы не допускается.

3. Порядок выполнения работы

1. Изучение методики измерения основных параметров элементов электрических цепей с помощью цифрового мультиметра.

1.1. Изучить порядок проведения измерений электрических величин с помощью мультиметра VC 9808⁺ (приложение 2).

1.2. На лабораторном макете с помощью мультиметра измерить значения сопротивлений *R1*, *R2*, индуктивностей *L1*, *L2* и емкостей *C1*, *C2*.

1.3. С помощью мультиметра измерить значения последовательного соединения сопротивлений *R1*, *R2*, индуктивностей *L1*, *L2* и емкостей *C1*, *C2*.

1.4. С помощью мультиметра измерить значения параллельного соединения сопротивлений *R1*, *R2*, индуктивностей *L1*, *L2* и емкостей *C1*, *C2*.

1.5. Получить у преподавателя набор из 10 резисторов. С помощью мультиметра измерить величину сопротивления каждого резистора. Данные занести в таблицу. Рассчитать среднее значение сопротивления по формуле:

$$\left\langle R\right\rangle = \frac{\sum_{i} R_{i}}{n},\tag{1.22}$$

где *n* – число измеренных резисторов.

Вычислить относительную погрешность отклонения значения сопротивления каждого резистора от номинального значения в %

$$\delta = \frac{\Delta R}{R_{HOM}} = \frac{R_i - R_{HOM}}{R_{HOM}} \cdot 100 \,. \tag{1.23}$$

Убедиться, что относительная погрешность не превышает 10 %.

| | R_1 | R_2 | R_3 | R_4 | R_5 | R_6 | R_7 | R_8 | R_9 | R_{10} |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| Измеренное значе- | | | | | | | | | | |
| ние сопротивления, | | | | | | | | | | |
| Ом | | | | | | | | | | |
| $\langle R \rangle$ | | | | | | | | | | |
| Отн. погрешн., % | | | | | | | | | | |

2. Исследование основных видов переменных сигналов с помощью осциллографа.

2.1. Включить цифровой запоминающий осциллограф АКИП 4115/3А и генератор сигналов специальной формы GFG 3015.

2.2. Исследование параметров переменного напряжения гармонической (синусоидальной) формы.

2.2.1. Установить на генераторе сигнал гармонической формы с частотой 5 кГц, амплитудой 5 В и асимметрией 50 %.

2.2.2. Установить на осциллографе развертку по вертикали 2 В/деление, по горизонтали 25 мкс/деление.

2.2.3. Зарисовать полученную осциллограмму в отчет, с помощью курсоров определить амплитуду сигнала, период, циклическую и линейную частоту.

2.3. Исследование параметров переменного напряжения треугольной формы.

2.3.1. Переключить генератор на формирование сигнала треугольной формы.

2.3.2. Зарисовать полученную осциллограмму в отчет, с помощью курсоров определить амплитуду сигнала, период и линейную частоту.

2.4. Исследование параметров переменного напряжения прямоугольной формы.

2.4.1. Переключить генератор на формирование сигнала прямоугольной формы.

2.4.2. Зарисовать полученную осциллограмму в отчет, с помощью курсоров определить амплитуду сигнала, период и линейную частоту.

2.5. Исследование параметров импульсного переменного напряжения.

2.5.1. Установить на генераторе смещение 2,5 В, асимметрию 20 %.

2.5.2. Зарисовать полученную осциллограмму в отчет, с помощью курсоров определить амплитуду сигнала, длительность импульса, период и линейную частоту. По полученным данным определить скважность последовательности импульсов $Q=T/t_u$.

2.6. Провести анализ полученных результатов.

4. Контрольные вопросы

1. Сформулировать закон Ома.

2. Сформулировать законы Кирхгофа.

3. Что такое источник ЭДС?

4. Что такое источник тока?

5. Какое внутреннее сопротивление должны иметь амперметр и вольтметр?

6. Как рассчитывается общее сопротивление при последовательном и параллельном соединениях?

7. Как рассчитывается индуктивность при последовательном и параллельном соединениях?

8. Как рассчитывается емкость при последовательном и параллельном со-единениях?

9. Как преобразовать соединение сопротивлений звездой в треугольник и обратно?

10. Основные параметры сигналов гармонической, импульсной и треугольной формы.

11. Изобразите с обозначением масштабов по горизонтальной и вертикальной осям напряжение, которое описывается выражением

 $U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) + U_0$, если $U_m = 5$ В, $\omega = 100$ 1/с, $\varphi_0 = \pi/6$, $U_0 = 2,5$ В.

12. Изобразите с обозначением масштабов по горизонтальной и вертикальной осям напряжение, которое описывается выражением

 $U(t) = U_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + U_0$, если $U_m = 2$ В, $\omega = 100$ 1/с, $\varphi_0 = \pi/4$, $U_0 = -3$ В.

13. Изобразите с обозначением масштабов по горизонтальной и вертикальной осям импульсное напряжение прямоугольной формы, которое имеет следующие параметры: *f*=100 кГц, *U_m*=3 B, *Q*=4.

Лабораторная работа № 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Целью работы является изучение существующих методов расчета сложных электрических цепей и исследование режимов работы цепи постоянного тока.

1. Общие сведения

Постоянным называется электрический ток, неизменный по направлению и величине. Мгновенные значения тока и напряжения в цепи постоянного тока всегда одинаковые i(t)=I, u(t)=U. Законы электротехники справедливы для мгновенных значений токов и напряжений, поэтому они являются общими как для цепей постоянного, так и цепей переменного тока. Особенностью цепей постоянного тока является то, что нагрузками в них могут быть только сопротивления. Действительно, в соответствии с соотношениями между токами и напряжениями для индуктивностей и емкостей вида

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}, \ i_C = C \frac{du_C}{dt}$$
(2.1)

напряжение на индуктивности и ток через емкость при постоянных величинах i_L и u_C оказываются равными $u_L=0$, $i_C=0$. Это означает, что индуктивность в цепях постоянного тока можно рассматривать как короткое замыкание, а емкость - как разрыв. Таким образом, цепи постоянного тока могут включать в себя источники постоянного тока (генераторы тока), источники постоянного напряжения (источники ЭДС) и нагрузки в виде сопротивлений.

Электрические цепи могут быть линейными и нелинейными, простыми и сложными, активными и пассивными. Линейные цепи состоят только из элементов с линейными ВАХ. Для линейных цепей справедлив *принцип суперпозиции (принцип наложения): реакция от суммы воздействий равна сумме реакций от каждого из этих воздействий.* В линейной цепи все источники электрической энергии действуют независимо друг от друга. Наличие в электрической цепи хотя бы одного элемента с нелинейной ВАХ делает всю цепь нелинейной. В дальнейшем будем рассматривать линейные цепи.

Активная цепь, наряду с нагрузками, содержит источники электрической



Рис. 2. 1. Графическое изображение двухполюсника

энергии, пассивная цепь состоит только из нагрузок. Простая цепь содержит один источник электрической энергии, сложная – два или более.

Частным случаем электрических цепей являются двухполюсники, имеющие два входных зажима (рис. 2. 1). Двухполюсник, состоящий только из пассивных элементов (нагрузок), называется пассивным. Если, кроме нагрузок, двухполюсник содержит источники электрической энергии, он является акТИВНЫМ.

Двухполюсники любой сложности и конфигурации можно заменить эквивалентной схемой. Для пассивного двухполюсника эквивалентная схема представляет собой сопротивление, а для активного – источник ЭДС и сопротивление (рис. 2. 2). Сопротивление R_{ex} называют входным сопротивлением двухполюсника.

Основной задачей при рассмотрении электрической цепи является расчет токов во всех ее ветвях. По известным токам можно рассчитать напряжения и выделяемую на ее элементах мощность. Существующие методы расчета элек-



Рис. 2. 2. Эквивалентные схемы (а) – пассивного и (б) – активного двухполюсников



Рис. 2. 3. Простая электрическая цепь (a) и ее эквивалент (б)

трических цепей отличаются различной степенью сложности.

Простая цепь (пример на рис. 2. 3) рассчитывается методом последовательных преобразований. В начале расчета следует обозначить токи в ветвях электрической цепи и указать их направления. Далее, применяя ряд упрощений (используя преобразования параллельно или последовательно соединенных элементов, а если необходимо преобразования треугольника в звезду или наоборот), получают цепь в виде одного контура, в котором рассчитывается ток. Для приведенного примера

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_{23}}$$
, где $R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$. (2.2)

Далее рассчитываются напряжение между узлами а и б

$$U_{a\delta} = R_{23} \cdot I_1 \tag{2.3}$$

и токи в ветвях

$$I_2 = U_{ab}/R_2, I_3 = U_{ab}/R_3. \tag{2.4}$$

Для расчета сложных цепей применяются методы наложения, контурных токов, узловых потенциалов, расчет по законам Кирхгофа. Рассмотрим порядок расчета по некоторым из них на примере цепи, показанной на рис. 2. 4, а.

Расчет по *методу наложения* основан на применении принципа суперпозиции. Цепь разбивается на две простые цепи, каждая из которых содержит по одному источнику ЭДС E_1 или E_2 . При исключении одного из источников ЭДС в простой цепи он заменяется короткозамкнутым участком, так как внутреннее сопротивление идеального источника ЭДС равно нулю. В каждой цепи находятся частные токи $I_1', I_2', I_3'' и I_1'', I_2'', I_3'', создаваемые соответственно источни-$



Рис. 2. 4. Сложная электрическая цепь с двумя источниками ЭДС (a) и ее представление в виде двух простых цепей (б)

ками ЭДС E_1 и E_2 (рис. 2. 4, б). Далее рассчитываются полные токи как сумма частных

$$I_{I} = I_{I}' + I_{I}'', I_{2} = I_{2}' + I_{2}'', I_{3} = I_{3}' + I_{3}''.$$
(2.5)

Если ток после расчета имеет отрицательный знак, значит, первоначальное направление тока было выбрано неверно и его нужно изменить на противоположное.

Для проверки правильности расчета электрической цепи составляют уравнение баланса мощности: мощность, отдаваемая источником ЭДС, должна быть равна мощности, выделяющейся в нагрузках.

$$\sum_{i=l}^{n} E_{i} \cdot I_{i} + \sum_{k}^{p} U_{k} \cdot J_{k} = \sum_{j=l}^{m} R_{j} \cdot I_{j}^{2}.$$
(2.6)

Мощность, выделяемая в нагрузках, всегда положительная, а знак мощности источников ЭДС зависит от направлений ЭДС E_j и тока I_j , протекающего через них. Если направления совпадают, то мощность положительная (источник ЭДС отдает мощность), а если направления противоположные, то мощность отрицательная (источник ЭДС потребляет мощность). Мощность источника тока считается положительной, если направление его тока втекает в положительный полюс напряжения на нем.

Расчет электрической цепи может быть произведен по *законам Кирхгофа*. По I закону Кирхгофа для схемы рис. 2. 4, а получим уравнение

$$I_1 + I_2 = I_3.$$
 (2.7)

Для двух независимых контуров запишем уравнения по II закону Кирхгофа

$$E_{1} = R_{1} \cdot I_{1} + R_{3} \cdot I_{3},$$

$$E_{2} = R_{2} \cdot I_{2} + R_{3} \cdot I_{3}.$$
(2.8)

Решая систему из трех уравнений, находим токи *I*₁, *I*₂, *I*₃.

Метод контурных токов позволяет сократить количество уравнений. При расчете по этому методу в независимых контурах вводят контурные (расчетные) токи (для схемы на рис. 2. 4, а контурные токи I_{11} , I_{22}). Далее составляются уравнения по II закону Кирхгофа для контурных токов

$$\begin{cases} E_1 = R_1 \cdot I_{11} + R_3(I_{11} - I_{22}) \\ -E_2 = R_2 \cdot I_{22} + R_3(I_{22} - I_{11}) \end{cases}$$
(2.9)

Из решения системы двух уравнений определяем токи I_{11} и I_{22} , а по ним определяем реальные токи



Рис. 2. 5. Электрическая цепь (а) и ее эквивалентная схема (б)

$$I_{I} = I_{II}, I_{2} = I_{22}, I_{3} = I_{II} - I_{22}.$$
(2.10)

Во многих случаях требуется найти ток только в одной (выделенной) ветви электрической цепи. Такую задачу можно решить на основе *метода эквивалентного генератора*. Суть метода заключается в том, что электрическая цепь относительно выделенной ветви заменяется активным двухполюсником с эквивалентным ЭДС U_{xx} и входным сопротивлением R_{ex} (рис. 2. 5).

Ток в выделенной ветви рассчитывается по формуле

$$I_2 = U_{xx} / (R_{ex} + R_2). \tag{2.11}$$

Для нахождения тока I_2 требуется определить параметры эквивалентного двухполюсника R_{ax} и U_{xx} . Они могут быть найдены расчетным и опытным путем. При расчете R_{ax} в исходной электрической цепи выделенная ветвь отклю-



Рис. 2. 6. Схема для расчета входного сопротивления



Рис. 2. 7. Схема для расчета напряжения холостого хода

чается, а источник ЭДС закорачивается (рис. 2. 6) и рассчитывается сопротивление цепи относительно зажимов 1 – 2 (входное сопротивление)

$$R_{ex} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}.$$
 (2.12)

При расчете напряжения холостого хода U_{xx} выделенная ветвь отключается (рис. 2. 7) и находится напряжение между зажимами 1-2. Полученная цепь (для данного примера) состоит из одного контура, ток в котором равен

$$I = \frac{E_1 - E_3}{R_1 + R_3}.$$
 (2.13)

Далее находим напряжение холостого хода

$$U_{xx} = E_I - R_I \cdot I = E_3 + R_3 \cdot I \quad . \tag{2.14}$$

При экспериментальном определении параметров эквивалентной схемы в режимах холостого хода и короткого замыкания измеряют U_{xx} и I_{κ_3} . При этом входное сопротивление рассчитывается по формуле

$$R_{ex} = U_{xx}/I_{\kappa_3}.$$
 (2.15)

Рассмотрим цепь на рис. 2. 5, б, где сопротивление R_2 будем считать нагрузкой ($R_n = R_2$), напряжение холостого хода – напряжением источника ЭДС ($E = U_{xx}$), а сопротивление R_{ex} – внутренним сопротивлением источника ЭДС ($R_i = R_{ex}$). При изменении сопротивления R_n в цепи будут существовать различные режимы работы, которые будут характеризоваться следующими основными параметрами:

- выходное напряжение $U=R_{H}\cdot I$;
- выходная мощность $P=U\cdot I=R_{\mu}\cdot I^{2};$
- потребляемая от источника питания мощность $P_E = E \cdot I$;
- коэффициент полезного действия $\eta = P/P_E = R_H/(R_H + R_i)$.

На рис. 2. 8 показаны графики зависимостей этих параметров от величины выходного тока *I*. Ток *I* может меняться в пределах от I=0 до $I=I_{Make}$. Ток I=0



Рис. 2. 8. Зависимость параметров электрической цепи от выходного тока

соответствует режиму холостого хода, когда сопротивление нагрузки $R_{\mu} = \infty$. При этом выходное напряжение U=E, а КПД электрической цепи стремится к 1. В другом крайнем случае при $R_{\mu}=0$ (режим короткого замыкания) выходной ток достигает максимума $I_{Makc} = E/R_i$, а выходное напряжение и соответственно мошность в нагрузке и КПД равны нулю. Режим работы цепи при $R_i = R_{\mu}$ называется согласованным. В этом случае половина мощности выделяется в нагрузке, а другая половина - в источнике ЭДС и КПД составляет η=0,5. Наибольший КПД соответствует режиму холостого хода.

2. Методика выполнения работы

Перед выполнением работы составить отчет, который должен содержать краткие элементы теории, *исследуемые схемы*, *изображенные на рис. 2. 9 и* 2. 10, **таблицы и расчет** U_{xx} и R_{ex} . При расчете U_{xx} и R_{ex} учитывать, что E_{num} =10 В, R1=750 Ом, R2=1500 Ом, R3=10 кОм, R4=0.

При выполнении работы в отчет необходимо записывать все *формулы* и *расчеты*, *указанные в программе работы*.

В качестве сопротивления нагрузки R_{H} использовать переменный резистор R, а переменный резистор R4 должен быть установлен на **ноль** (приложение 1).

Измерение напряжения на элементах и токов в ветвях осуществляется с помощью *двух* мультиметров VC 9808⁺, полученных у преподавателя. Для измерения напряжения на элементах и токов в ветвях необходимо перевести ручки на мультиметрах в соответствующие положения. При измерении напряжения мультиметры должны находиться в режиме измерения постоянного тока (DC).

Выставление номинала сопротивления нагрузки осуществляется при отключенном резисторе из схемы и контролируется с помощью мультиметра, переведенного в положение измерения сопротивления. Измерение тока и напряжения на элементах производится при подключенных сопротивлениях в цепь.

Измерение напряжения холостого хода U_{xx} осуществляется при $R_{\mu} = \infty$ (вместо R_{μ} включается вольтметр), а параметр I_{κ_3}



Рис. 2. 9. Схема для измерения внутреннего сопротивления ис-



Рис. 2. 10. Схема исследуемой электрической цепи постоянного тока

измеряется при $R_{H}=0$ (вместо R_{H} включается амперметр).

Схемы и таблицы в отчете должны быть выполнены карандашом и в соответствии с требованиями ЕСКД.

Студент, не подготовивший отчет, к выполнению лабораторной работы не допускается.

3. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь постоянного тока в соответствии со схемой рис. 2. 9.

2. Измерить напряжение на источнике питания и ток через него для максимального и минимального значений сопротивления нагрузки. По формуле 2.16 определить внутреннее сопротивления источника питания

$$R_{_{GH}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$
(2.16)

3. Собрать электрическую цепь постоянного тока в соответствии со схемой рис. 2. 10. Выставить на генераторе напряжение синусоидальной формы с частотой *f*=5 кГц, амплитудой *U_m*=0,01 В, напряжением смещения 4,99 В.

4. Выставить сопротивление нагрузки $R_n=1,5$ кОм. Измерить токи во всех ветвях и напряжения на всех сопротивлениях электрической цепи. Данные занести в табл. 2. 1. С помощью измеренного значения тока и номиналов сопротивлений рассчитать падение напряжения на каждом сопротивлении. Получен-

ные данные занести в табл. 2. 1. Проверить выполнение I и II законов Кирхгофа для всех узлов и контуров электрической цепи, учитывая рассчитанное внутреннее сопротивление источника питания.

| $1 a O M \square a \square$. 1 |
|---------------------------------|
|---------------------------------|

| Параметр | R1 | | R | 2 | | <i>R3</i> | | р н |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|---------------|
| <i>I</i> , мА | | | | | | | | |
| U P | Pac | Изм | Pac | Изм | Pac | Изм | Pac | Изм |
| О, В | | | | | | | | |

5. Снять зависимость тока *I* и напряжения U_{R_H} при изменении сопротивления нагрузки в пределах $R_{\mu}=0.5$ кОм с шагом $\Delta R_{\mu}=0.5$ кОм. Рассчитать мощность в нагрузке для различных R_{μ} . Данные занести в табл. 2. 2.

6. Для схемы рис. 2. 9 измерить параметры U_{xx} и $I_{\kappa3}$ эквивалентного генератора относительно зажимов 1 – 2. По формуле $R_{6x} = U_{xx}/I_{\kappa3}$ рассчитать входное сопротивление. Сравнить полученные значения с результатами расчета, полученными при подготовке отчета. С использованием данных рассчитать потребляемую мощность от источников ЭДС и КПД для различных значений R_{μ} , мощность источника определять как $P_E = U_{xx} I$. Данные занести в табл. 2. 2.

Построить зависимости I, U, P_E, P и η от сопротивления нагрузки. Зависимости P_E, P отобразить на одном графике, а зависимости I, U и η на другом. На графиках указать масштаб и размерность всех отображаемых величин.

| T | 2 | 2 |
|----------|------|---|
| 1 аолица | . 2. | 2 |

| R_{H} , кОм | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 |
|---------------|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|-----|---|
| <i>I</i> , мА | | | | | | | | | | | |
| <i>U</i> , B | | | | | | | | | | | |
| Р, Вт | | | | | | | | | | | |
| P_E , BT | | | | | | | | | | | |
| η | | | | | | | | | | | |

4. Контрольные вопросы

1. Какая электрическая цепь называется линейной?

- 2. Сформулируйте принцип суперпозиции.
- 3. Какие элементы могут быть нагрузками в цепях постоянного тока?
- 4. В чем заключается метод расчета простых электрических цепей?
- 5. Как производится расчет электрических цепей методом наложения?
- 6. Как производится расчет электрических цепей методом контурных токов?

7. В каких случаях для расчета электрических цепей применяется метод эквивалентного генератора?

8. Как рассчитываются параметры U_{xx} и R_{ex} эквивалентного генератора?

9. Как изменяется режим работы электрической цепи при изменении сопротивления нагрузки?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы - изучение характера напряжения, тока и мощности в индуктивности и емкости при протекании через них переменного электрического тока.

1. Общие сведения

Переменным называется ток, изменяющийся во времени по величине или направлению. Наиболее распространенным является переменный синусоидальный ток, описываемый функцией

 $i(t) = I_m sin(\omega t + \varphi_0),$

где i(t) – мгновенное значение тока, I_m – амплитудное (наибольшее) значение тока, ω – угловая частота

[рад/с], ϕ_0 – начальная фаза синусоидального тока [рад]. График синусоидального тока показан на рис. 3.1. Кроме угловой частоты ω , используется линейная частота

$$f = \omega / 2\pi [\Gamma ц].$$

С частотой f связан период колебания

$$T = 1/f$$
 [c].

Начальная фаза характеризует сдвиг колебания во времени относительно начала координат на величину $t_0 = -\phi_0/\omega$.

На рис. 3.2 изображены синусоидальные напряжение и ток с одним и тем же периодом

i(t),u(t)

$$u(t) = U_m sin(\omega t + \varphi_u),$$

$$i(t) = I_m sin(\omega t + \varphi_i),$$

где ϕ_u , ϕ_i – начальные фазы напряжения и тока соответственно.

Следует отметить, что по оси абсцисс на рис. 3.2 отложено не время t, а пропорциональная ему величина ωt . Также необходимо обратить внимание, что положительные начальные фазы напряжения и



u(t

2π

ωt





тока откладываются от начала координат влево. Разность фаз $\phi = \phi_u - \phi_i$ называют углом сдвига тока по отношению к напряжению. При $\phi = \theta$ ток и напряжение совпадают по фазе, при $\phi = \pm \pi$ – противоположны по фазе.

Мгновенная мощность переменного тока является переменной величиной $p(t)=Ri^2(t)$. Для оценки энергии, выделяемой в нагрузке за некоторый интервал времени, пользуются действующим значением переменного тока *I*. Для расчета средней мощности вводят понятие действующего (эффективного) значения переменного тока I. Действующим называется такое значение переменного тока, которое вызывает выделение в активной нагрузке R энергии, равной энергии, выделяющейся от протекания эквивалентного постоянного тока. То есть средняя мощность переменного тока P_{cp} должна равняться мощности постоянного тока $P=RI^2$. Отсюда

$$RI^2T = \int_0^T Ri^2(t)dt$$

Так как синусоидальный ток является периодическим, в качестве интервала интегрирования берут период $T=2\pi/\omega$. Вычисление действующего значения для синусоидального тока дает результат $I = I_m / \sqrt{2} \approx 0.707 I_m$. Аналогичный результат получается для действующего значения напряжения $U = U_m / \sqrt{2}$.

Для расчета электрических цепей синусоидального тока используется символический метод, основанный на комплексном представлении синусоидальных токов и напряжений. Для расчетов мы используем комплексную амплитуду тока \dot{I}_m (или напряжения \dot{U}_m) либо комплексный действующий ток \dot{I} (или напряжение \dot{U}):

$$\begin{split} i(t) \to \dot{I}_m &= I_m e^{j\varphi_i}; \qquad u(t) \to \dot{U}_m = U_m e^{j\varphi_u}; \\ i(t) \to \dot{I} &= I e^{j\varphi_i}; \qquad u(t) \to \dot{U} = U e^{j\varphi_u}. \end{split}$$

В курсе электротехники мнимую единицу принято обозначать $j = \sqrt{-1}$. Известно, что любое комплексное число (в данном случае \dot{I}) можно представить :



Рис. 3.3. Изображение комплексного числа вектором на комплексной плоскости

–в алгебраической форме $\dot{I} = a + jb$;

-в тригонометрической форме

$$I = I[\cos\varphi_i + j\sin\varphi_i];$$

-в показательной форме $\dot{I} = Ie^{j\varphi_i}$;

-вектором на комплексной плоскости (рис. 3.3).

Над комплексными числами, изображающими синусоидальные токи и напряжения, можно производить все алгебраические действия. При сложении и вычитании удобнее пользоваться алгебраической формой записи, а при умножении, делении – показательной. Существуют формулы для перехода из одной формы представления комплексного числа к другой:

$$I = \sqrt{a^2 + b^2}; \qquad \varphi_i = arctg\left(\frac{b}{a}\right);$$

$$a = I \cdot cos\varphi_i; \qquad b = I \cdot sin\varphi_i.$$

В отличие от реальных физических величин, таких как ток, напряжение, ЭДС, комплексные ток, напряжение, ЭДС, а также производные от них комплексные сопротивления и проводимости не являются физическими величинами и не имеют единиц измерения. Однако замена синусоидальных токов и напряжений соответствующими им комплексными числами позволяет существенно упростить математический анализ процессов в электрических цепях переменного тока. В данном случае оперировать не дифференциальными уравнениями, а алгебраическими.

При расчетах удобно не только комплексные амплитуды (или действующие значения) токов и напряжений изображать векторами на комплексной плоскости, но и расчет полезно вести составляя подобные диаграммы – векторные диаграммы, под которыми понимают совокупность векторов на комплексной плоскости, характеризующих процессы, происходящие в данной цепи переменного тока, и построенных с соблюдением правильной ориентации их относительно друг друга.

Рассмотрим свойства пассивных R, L, C элементов при протекании через них тока синусоидальной формы $i(t)=I_m sin\omega t$.

Активное сопротивление. В соответствии с законом Ома напряжение на сопротивлении

$$u(t) = Ri(t) = RI_m sin\omega t = U_m sin\omega t$$
.

Из записанного выражения следует, что ток через сопротивление и напряжение на сопротивлении изменяются по одинаковому закону, между ними нет сдвига фазы. Мгновенная мощность на сопротивлении всегда положительная



Рис. 3.4. Временные диаграммы тока, напряжения и мгновенной мощности (а), векторная диаграмма тока и напряжения (б) для активного сопротивления

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m \cdot I_m \cdot \sin^2 \omega t = \frac{U_m \cdot I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) = U \cdot I (1 - \cos 2\omega t) \ge 0.$$

Временные диаграммы тока, напряжения и мгновенной мощности показаны на рис. 3.4.

Индуктивность. Связь между током через индуктивность и напряжением на индуктивности устанавливается законом электромагнитной индукции

$$U = L \frac{di}{dt}.$$

При протекании через индуктивность тока $i(t)=I_m sin\omega t$ на индуктивности создается напряжение

$$u(t) = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \cos \omega t = x_L I_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ),$$

где $X_L = \omega L$ – реактивное сопротивление индуктивности [Ом]. Амплитуда напряжения на индуктивности $U_m = X_L I_m = \omega L I_m$. Из сравнения выражений для i(t) и u(t) следует, что между током через индуктивность и напряжением на индуктивности существует сдвиг по фазе. Причем напряжение опережает ток на 90°. Мгновенная мощность на индуктивности изменяется по закону

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m \cdot I_m \cdot \cos \omega t \cdot \sin \omega t = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \sin 2\omega t = U \cdot I \cdot \sin 2\omega t .$$

Временные диаграммы тока, напряжения и мощности, а также векторная диаграмма тока и напряжения показаны на рис. 3.5. Мощность на индуктивности описывается знакопеременной функцией. Когда p(t)>0, индуктивность накапливает энергию, при p(t)<0 индуктивность возвращает энергию обратно в электрическую цепь, в том числе и в источник энергии. При этом средняя мощность за период оказывается равной нулю. Так как индуктивность энергию не расходует, ее называют реактивным элементом. Реактивное сопротивление индуктивности $X_L=\omega L$ зависит от частоты (рис. 3.6). На постоянном токе при $\omega=0$ сопротивление $X_L=0$ и индуктивность в схеме представляет собой короткозамк-



Рис. 3.5. Временные диаграммы тока, напряжения и мгновенной мощности (а), векторная диаграмма тока и напряжения (б) для индуктивности

Рис. 3.6. Зависимость сопротивления индуктивности от частоты



Рис. 3.7. Временные диаграммы тока, напряжения и мгновенной мощности (а), векторная диаграмма тока и напряжения (б) для емкости

Рис. 3.8. Зависимость сопротивления емкости от частоты

нутый участок. На высоких частотах при $\omega \rightarrow \infty$ индуктивность в схеме можно рассматривать как разрыв $X_L \rightarrow \infty$.

Емкость. При протекании через емкость тока $i(t)=I_m sin\omega t$ на ней создается напряжение, определяемое выражением

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{0}^{t} i dt = \int_{0}^{t} I_{m} \cdot \sin \omega t = -\frac{I_{m}}{\omega C} \cos \omega t = \frac{I_{m}}{X_{C}} \sin(\omega t - 90^{\circ}),$$

где $X_C = 1/\omega C$ – реактивное сопротивление емкости [Ом]. Приведенные выражения для *i* и *u* показывают, что между током через конденсатор и напряжением на конденсаторе существует сдвиг фазы, причем ток опережает напряжение на 90°. Величина $U_m = I_m / \omega C$ является амплитудой напряжения на конденсаторе. Мгновенная мощность на конденсаторе изменяется по закону

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = -U_{\rm m} \cdot I_{\rm m} \cdot \cos \omega t \cdot \sin \omega t = -\frac{U_{\rm m} \cdot I_{\rm m}}{2} \sin 2\omega t = -U \cdot I \cdot \sin 2\omega t .$$

Временные диаграммы для i(t), u(t), p(t) и векторная диаграмма тока и напряжения показаны на рис. 3.7. Мгновенная мощность на емкости изменяется по синусоидальному закону. Когда p(t)>0, емкость накапливает энергию, при p(t)<0 емкость возвращает энергию обратно в электрическую цепь, в том числе и в источник энергии. При этом средняя мощность за период оказывается равной нулю. Емкость, как и индуктивность, энергию не расходует, поэтому также является реактивным элементом. Реактивное сопротивление емкости $X_C=1/\omega C$ зависит от частоты (рис. 3.8). На низких частотах при $\omega \rightarrow 0$ реактивное сопротивление емкости стремится к ∞ , и в схеме ее можно рассматривать как разрыв. С ростом частоты, при $\omega \rightarrow \infty$, сопротивление $X_C \rightarrow \infty$, и конденсатор в схеме можно учитывать как короткозамкнутый участок.

2. Методика выполнения работы

В исследуемых электрических цепях действует напряжение вида $e(t) = E_m sin\omega t$, т.е. начальная фаза источника ЭДС равна нулю.

Осциллограммы напряжения на исследуемых элементах необходимо снимать при одинаковых масштабах (по шкале напряжения – 2 В на обоих каналах, масштаб по шкале времени 500 мкс) в режиме постоянного и переменного напряжений (DC). Зарисовывая временные диаграммы напряжения на исследуемом элементе и напряжения на генераторе, учитывайте, что начальная фаза напряжения на генераторе равна нулю. Временные диаграммы наложить друг на друга путем совмещения их осей абсцисс (на экране осциллографа совместить положение первого и второго каналов). На осях временной диаграммы необходимо обозначить измеряемые величины, их размерность и масштаб. На графике изобразить 2 периода изменения напряжения.

Действующие значения напряжений на элементах измеряются мультиметром в режиме AC.

Для измерения разности фаз напряжения на исследуемом элементе и напряжения на генераторе e(t) необходимо курсорами в режиме «ВРЕМЯ» отметить ближайшие точки пересечения сигналов первого и второго каналов с нулевым уровнем, при этом временные диаграммы должны быть наложены друг на друга путем совмещения их осей абсцисс (на экране осциллографа совместить положение первого и второго каналов). Значение измеренного временного интервала ΔT отображается в верхнем левом углу экрана осциллографа. Фаза сдвига связана с временем смещения как $\phi = \Delta T \omega$ [рад].

Так как осциллограф измеряет сигналы относительно «земли», для получения корректной осциллограммы на исследуемом элементе его необходимо подключать относительно «земли».

Перед выполнением работы составить отчет, который должен содержать краткие элементы теории, *все исследуемые схемы, таблицы и расчеты, указанные в программе работы.* Схемы и таблицы должны быть выполнены карандашом и в соответствии с требованиями ЕСКД.

Студент, не подготовивший отчет, к выполнению лабораторной работы *не допускается.*

3. Порядок выполнения работы

1. Исследование RL-цепи.

1.1. Измерение параметров переменного напряжения на индуктивности $u_L(t)$.

1.1.1. На лабораторном макете собрать электрическую цепь в соответствии со схемой на рис. 3.9. В качестве сопротивления R использовать резистор R2 номиналом 1500 Ом (приложение 1), в качестве индуктивности L – индуктивность L1 номиналом 1 Гн.



Рис. 3.9. Схема для измерения параметров переменного напряжения на индуктивности



Рис. 3.10. Схема для измерения параметров переменного напряжения на сопротивлении в RL – цепи

1.1.2. Выставить на генераторе синусоидальное напряжение с амплитудой U_m =5 В (напряжение смещения – 0 В, асимметрия – 50 %) и частотой 50 Гц. Изменяя частоту генератора от 50 Гц до 400 Гц с шагом 50 Гц, с помощью мультиметра измерить напряжение на индуктивности U_L (данные занести в табл. 3. 1).

1.1.3. Установить на генераторе частоту 200 Гц, подключить к точкам 1 и 2 (рис. 3.9) первый и второй каналы осциллографа (клеммы KI и KII осциллографа на лабораторном макете) соответственно. Зарисовать временные диаграммы напряжения на индуктивности $u_L(t)$ и напряжения на генераторе e(t), определить разность фаз напряжения на индуктивности $u_L(t)$ и напряжения на генераторе e(t) в секундах, градусах и радианах. Данные занести в табл. 3. 3.

1.1.4. В собранной электрической цепи заменить индуктивность L1 на параллельное соединение индуктивностей L1 и L2 (номинал полученной индуктивности рассчитать самостоятельно и занести в табл. 3. 1). Повторить измерения по пп. 1.1.2 и 1.1.3 для данной схемы.

1.2. Измерение параметров переменного напряжения на сопротивлении $u_R(t)$.

1.2.1. На лабораторном макете собрать электрическую цепь в соответствии со схемой на рис. 3.10. В качестве сопротивления R использовать резистор R2 номиналом 1500 Ом, в качестве индуктивности L – индуктивность L1 номиналом 1 Гн.

1.2.2. Выставить на генераторе синусоидальное напряжение с амплитудой U_m =5 В (напряжение смещения – 0 В, асимметрия – 50 %) и частотой 50 Гц. Изменяя частоту генератора от 50 Гц до 400 Гц, с шагом 50 Гц, с помощью мультиметра измерить напряжение на резисторе U_R (данные занести в табл. 3. 1).

1.2.3. Установить на генераторе частоту 200 Гц, зарисовать временные диаграммы напряжения на резисторе $u_R(t)$, напряжения на генераторе e(t) и определить разность фаз напряжения на резисторе $u_R(t)$ и напряжения на генераторе e(t). Используя данные п. 1.1.3 определить разность фаз напряжения на резисторе $u_R(t)$ и напряжения на индуктивности $u_L(t)$. Данные занести в табл. 3. 3.

1.2.4. В собранной электрической цепи заменить индуктивность *L1* на параллельное соединение индуктивностей *L1* и *L2*. Повторить измерения по пп. 1.2.2 и 1.2.3 для данной схемы.



Рис. 3.11. Схема для измерения параметров переменного напряжения на конденсаторе



Рис. 3.12. Схема для измерения параметров переменного напряжения на сопротивлении в RC – цепи

Таблица 3 1

| | | | | | - | | | | |
|------------------------------|----|--------------|----------|--------|-----|--|--|--|--|
| R=1500 Ом, L=1 Гн, Rг=100 Ом | | | | | | | | | |
| f, Гц | 50 | 100 | | 350 | 400 | | | | |
| U_L, B | | | | | | | | | |
| U_{R}, B | | | | | | | | | |
| I, мА | | | | | | | | | |
| Х _L , Ом | | | | | | | | | |
| | R | =1500 Ом, L= | Гн, Rг=_ | 100 Ом | | | | | |
| U_L , B | | | | | | | | | |
| U_{R} , B | | | | | | | | | |
| І, мА | | | | | | | | | |
| X_L , O_M | | | | | | | | | |

1.3. По данным табл. 3. 1 рассчитать ток в RL-цепи $I=U_R/R$ и реактивное сопротивление индуктивности $X_L = U_L/I$ на различных частотах. Построить графики зависимости X_L от f для 2 значений L.

2. Исследование RC-цепи.

2.1. Измерение параметров переменного напряжения на емкости $u_C(t)$.

2.1.1. На лабораторном макете собрать электрическую цепь в соответствии со схемой на рис. 3.11. В качестве сопротивления R использовать резистор R1 номиналом 750 Ом, в качестве емкости C – конденсатор C1 номиналом 1 мкФ.

2.1.2. Выставить на генераторе синусоидальное напряжение с амплитудой U_m =5 В (напряжение смещения – 0 В, асимметрия – 50 %) и частотой 50 Гц. Изменяя частоту генератора от 50 Гц до 400 Гц с шагом 50 Гц, с помощью мультиметра измерить напряжение на емкости U_C (данные занести в табл. 3. 2).

2.1.3. Установить на генераторе частоту 200 Гц, зарисовать временные диаграммы напряжения на емкости $u_C(t)$ и напряжения на генераторе e(t), определить разность фаз напряжения на емкости $u_C(t)$ и напряжения на генераторе e(t). Данные занести в табл. 3. 3.

2.1.4. В собранной электрической цепи заменить конденсатор C1 на последовательное соединение конденсаторов C1 и C2 (номинал полученной емкости рассчитать самостоятельно и занести в табл. 3. 2). Повторить измерения по пп. 2.1.2 и 2.1.3 для данной схемы.

2.2. Измерение параметров переменного напряжения на сопротивлении $u_R(t)$.

Таблица 3.2

| R=750 Ом, C=1 мкФ, Rг=100 Ом | | | | | | | | |
|------------------------------|-----|-----------|-------------|------|-----|--|--|--|
| <i>f</i> , Гц | 50 | 100 | | 350 | 400 | | | |
| U_{C}, B | | | | | | | | |
| U_{R}, B | | | | | | | | |
| I, мА | | | | | | | | |
| Х _С , Ом | | | | | | | | |
| | R=7 | 50 Ом, С= | мкФ, Rг=100 |) Ом | | | | |
| U_{C}, B | | | | | | | | |
| U_{R}, B | | | | | | | | |
| I, мА | | | | | | | | |
| Х _С , Ом | | | | | | | | |

2.2.1. На лабораторном макете собрать электрическую цепь в соответствии со схемой на рис. 3.12. В качестве сопротивления R использовать резистор R1 номиналом 750 Ом, в качестве емкости C – конденсатор C1 номиналом 1 мкФ.

2.2.2. Выставить на генераторе синусоидальное напряжение с амплитудой U_m =5 В (напряжение смещения – 0 В, асимметрия – 50 %) и частотой 50 Гц. Изменяя частоту генератора от 50 Гц до 400 Гц с шагом 50 Гц, с помощью мультиметра измерить напряжение на резисторе U_R (данные занести в табл. 3. 2).

Таблица 3.3

| RL–цепь, L=L1 | | | | | | | | |
|------------------|------------------|--------------------|-----------------|--|--|--|--|--|
| | $e(t)-u_L(t)$ | $e(t)-u_R(t)$ | $u_L(t)-u_R(t)$ | | | | | |
| ΔT , [c] | | | | | | | | |
| ф, [рад] | | | | | | | | |
| φ, [°] | | | | | | | | |
| | RL–цепь, | L=L1//L2 | | | | | | |
| | $e(t)-u_L(t)$ | $e(t)-u_R(t)$ | $u_L(t)-u_R(t)$ | | | | | |
| ΔT , [c] | | | | | | | | |
| ф, [рад] | | | | | | | | |
| φ, [°] | | | | | | | | |
| RC–цепь, С=СІ | | | | | | | | |
| | $e(t)-u_C(t)$ | $e(t)-u_R(t)$ | $u_C(t)-u_R(t)$ | | | | | |
| ΔT , [c] | | | | | | | | |
| ф, [рад] | | | | | | | | |
| φ, [°] | | | | | | | | |
| | RC-цепь, C=C1 по | следовательно с С2 | | | | | | |
| | $e(t)-u_C(t)$ | $e(t)-u_R(t)$ | $u_C(t)-u_R(t)$ | | | | | |
| ΔT , [c] | | | | | | | | |
| ф, [рад] | | | | | | | | |
| φ, [°] | | | | | | | | |

2.2.3. Установить на генераторе частоту 200 Гц, зарисовать временные диаграммы напряжения на резисторе $u_R(t)$, напряжения на генераторе e(t) и определить разность фаз напряжения на резисторе $u_R(t)$ и напряжения на генераторе e(t). Используя данные п. 2.1.3 определить разность фаз напряжения на резисторе $u_R(t)$ и напряжения на емкости $u_C(t)$. Данные занести в табл. 3. 3.

2.2.4 В собранной электрической цепи заменить конденсатор *C1* на последовательное соединение конденсаторов *C1* и *C2*. Повторить измерения по пп. 2.2.2 и 2.2.3 для данной схемы.

2.3. По данным табл. 3. 2 рассчитать ток в RC-цепи $I=U_R/R$ и реактивное сопротивление емкости $X_C=U_C/I$ на различных частотах. Построить графики зависимости X_C от f для 2 значений C.

3. Провести анализ полученных результатов.

4. Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуется переменный ток синусоидальной формы?

2. Изобразить временную диаграмму синусоидального тока, указать на диаграмме параметры I_m , T, φ .

3. Что такое действующее значение напряжения?

4. Каковы свойства активного сопротивления *R* в цепи переменного синусоидального тока?

5. Каковы свойства индуктивности *L* в цепи переменного синусоидального тока?

6. Каковы свойства емкости С в цепи переменного синусоидального тока?

7. В чем заключается символический метод расчета электрических цепей синусоидального тока?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ RLC ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы – изучение неразветвленных и разветвленных электрических цепей переменного синусоидального тока, содержащих разнородные реактивные элементы, и методов их расчета.

1. Общие сведения

При решении задачи анализа электрических цепей необходимо определить напряжения на элементах электрической цепи и токи в ее ветвях. При анализе разветвленных цепей переменного синусоидального тока становится сложно записывать уравнения для мгновенных значений токов и напряжений. Поэтому для расчета электрических цепей синусоидального тока используется символический метод, основанный на комплексном представлении тока. Известно, что синусоидальная величина может быть представлена вектором на комплексной плоскости (рис. 4. 1, а, б). При этом значение синусоидальной величины в любой момент времени может быть определено как проекция вектора

$$\dot{i}(t) = \dot{I}_m \cdot e^{j\omega t} = I_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}$$
(4.1)

на ось мнимых чисел. То есть действительные значения тока получают как мнимую часть от комплексного числа (рис. 4. 1, а):

$$i(t) = Jm \cdot \dot{i}(t) = Jm[I_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}] =$$

= $Jm[I_m \cdot cos(\omega t + \varphi) + jI_m \cdot sin(\omega t + \varphi)] = I_m \cdot sin(\omega t + \varphi).$ (4.2)

Значение $\dot{i}(t) = \dot{I}_m \cdot e^{j\omega t}$ называют комплексом мгновенного значения тока. Так как синусоидальная функция в любой момент времени *t* может быть определена по известным параметрам $I_{m\nu}$ ω , φ , то все расчеты производят для момента времени *t*=0. Тогда $\omega t=0$ и комплекс мгновенных значений преобразует-



ся в комплекс амплитуды тока

$$\dot{i}(0) = \dot{I}_m \cdot e^{j0} = \dot{I}_m, \ \dot{I}_m = I_m e^{j\phi}.$$
 (4.3)

При расчетах часто используют комплекс действующего значения тока. Он, как и действующее значение, отличается от комплекса амплитудного значения тока в $1/\sqrt{2}$ раз ($\dot{I} = \dot{I}_m / \sqrt{2}$).

Для использования символического метода необходимо перейти от уравнений, составленных для мгновенных значений токов и напряжений, которые являются дифференциальными, к алгебраическим. Этот переход осуществляется следующим образом.

В электрических цепях синусоидального тока для реактивных элементов *L* и *C* вводят понятие комплексных сопротивлений

$$Z_L = j \cdot X_L = j\omega L,$$

$$\dot{Z}_C = -jX_C = \frac{l}{j\omega C}.$$
(4.4)

Здесь множитель *j* учитывает сдвиг фазы между током и напряжением в индуктивности и емкости. Значение активного сопротивления остается таким же, как в цепях постоянного тока.

Мгновенные значения токов в ветвях и напряжений на элементах заменяются их комплексными амплитудными (либо комплексными действующими) значениями. После замены ток и напряжения на элементах будут иметь вид

$$\begin{split} i(t) \Rightarrow \dot{I}_{m} \text{ или } \dot{I}, \\ e(t) \Rightarrow \dot{E}_{m} \text{ или } \dot{E}, \\ u_{R}(t) = i(t) \cdot R \Rightarrow \dot{U}_{mR} = \dot{I}_{m} \cdot R \text{ или } \dot{U}_{R} = \dot{I} \cdot R, \\ u_{L}(t) = L \frac{di}{dt} \Rightarrow \dot{U}_{mL} = \dot{I}_{m} \cdot \dot{Z}_{L} = \dot{I}_{m} \cdot j\omega L \text{ или } \dot{U}_{L} = \dot{I} \cdot \dot{Z}_{L} = \dot{I} \cdot j\omega L, \quad (4.5) \\ u_{C}(t) = \frac{1}{C} \int \dot{I}(t) dt \Rightarrow \dot{U}_{mC} = \dot{I}_{m} \cdot \dot{Z}_{C} = \dot{I}_{m} \cdot \frac{1}{j\omega C} \text{ или } \dot{U}_{C} = \dot{I} \cdot \dot{Z}_{C} = \dot{I} \cdot \frac{1}{j\omega C}. \end{split}$$

В дальнейшем при выполнении расчетов будем использовать комплексные действующие значения напряжений и токов.

Рассмотрим неразветвленную цепь переменного тока, содержащую источник ЭДС, активное сопротивление, емкость и индуктивность (рис. 4. 2).



Рис. 4. 2. Неразветвленная электрическая цепь переменного тока

При переходе от мгновенных значений токов и напряжений к комплексным (амплитудным) действующим оказывается возможным использование для расчета цепей переменного тока законов Ома и Кирхгофа, а также методов, применяемых для расчета электрических цепей постоянного тока (методы наложения, контурных токов, эквивалентного генератора и др.). Законы Ома и Кирхгофа для цепей переменного тока в символической форме имеют вид

$$\dot{I} = \dot{U} / \dot{Z}, \sum_{k=l}^{n} \dot{I}_{k} = 0, \sum_{k=l}^{n} \dot{Z}_{k} \cdot \dot{I}_{k} = \sum_{l=l}^{m} \dot{E}_{l}.$$
(4.6)

Применение символического метода расчета электрических цепей переменного тока позволяет перейти от решения дифференциальных уравнений к решению алгебраических уравнений, что значительно упрощает расчеты. Рассмотрим порядок расчета символическим методом электрической цепи переменного тока, показанной на рис. 4. 2. В цепи действует ЭДС

$$e(t) = E_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \Longrightarrow \dot{E} = E \cdot e^{j\varphi_0} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\varphi_0}.$$
(4.7)

В этой цепи по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений тока можно составить интегрально-дифференциальное уравнение вида

$$e(t) = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i \cdot dt .$$
(4.8)

В символической форме это уравнение примет вид

$$\dot{E} = R \cdot \dot{I} + jX_L \dot{I} - jX_C \dot{I} .$$
(4.9)

Из последнего уравнения получим формулу для комплексного тока цепи

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{R + jX_L - jX_C} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}},$$
(4.10)

где $\dot{Z} = R + jX_L - jX_C$ – комплексное сопротивление цепи. В общем случае комплексное сопротивление имеет действительную *R* и мнимую *X* части:

$$X = X_{L} - X_{C} = \omega L - \frac{l}{\omega C},$$

$$\dot{Z} = R + jX = |\dot{Z}|e^{j\varphi_{Z}},$$

$$|\dot{Z}| = \sqrt{R^{2} + X^{2}},$$

$$\varphi_{Z} = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}.$$
(4.11)

Получив выражение для комплексного значения тока $\dot{I} = \dot{E} / \dot{Z} = I \cdot e^{j\varphi}$, далее перейдем к мгновенным значениям тока

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t + \varphi) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$
(4.12)

Из-за комплексного характера полного сопротивления цепи \dot{Z} между ЭДС $\dot{E} = E \cdot e^{j\varphi_0}$ и током $\dot{I} = I \cdot e^{j\varphi}$ возникает сдвиг фазы

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} = \frac{E_m \cdot e^{j\varphi_0}}{\left|\dot{Z}\right| \cdot e^{j\varphi_Z}} = \frac{E_m}{\left|\dot{Z}\right|} e^{j(\varphi_0 - \varphi_Z)} = I \cdot e^{j\varphi}.$$
(4.13)

Рассчитав ток *İ*, далее можно определить напряжения на пассивных элементах

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I}, \ \dot{U}_L = j\omega L \cdot \dot{I}, \ \dot{U}_C = \frac{I}{j\omega C}.$$
 (4.14)



Рис. 4. 3. Векторная и топографическая диаграммы неразветвленной электрической цепи переменного тока

По полученным данным строят векторную диаграмму токов, отображающую комплексные токи в цепи, и топографическую диаграмму напряжений, отображающую комплексные потенциалы в пепи (рис. 4. 3). Векторная диаграмма токов является интерпретацией I закона Кирхгофа, а топографическая диаграмма напряжений - интерпретацией II закона Кирхгофа для электрической цепи синусоидального тока в векторной форме. Векторную и топографическую диаграммы строят на одном графике в разных масштабах. Совместное построение диаграмм позволяет демонстрировать сдвиги фаз между токами и на-

пряжениями в элементах электрической цепи.

Сначала строят векторную диаграмму токов. Для ее построения векторы всех токов, протекающих в цепи, откладывают из начала координат. В процессе построения графическим методом контролируют соблюдение первого закона Кирхгофа. В схеме рис. 4. 2 протекает только один ток величиной *I* и фазой φ.

Для построения топографической диаграммы напряжений на схеме электрической цепи расставляют точки с различающимися потенциалами и нумеруют их, начиная с 0. За 0-ю точку обычно принимают условно отрицательный электрод источника ЭДС. Точка 0 совпадает с началом координат на комплексной плоскости. Потенциалы расставляют, двигаясь против направления протекания тока. Точке потенциала с максимальным номером соответствует потенциал положительного электрода источника ЭДС. В схеме рис. 4. 2 потенциал изменяется 3 раза, таким образом, на схеме отмечаются 4 точки. Из 0 откладывается вектор напряжения на сопротивлении, который совпадает с током по фазе, и попадает в точку 1. Конец вектора \dot{U}_{R} направлен к большему потенциалу (к точке 1). Из точки 1 откладывается вектор напряжения на индуктивности, он опережает вектор тока на 90°. Конец вектора \dot{U}_{L} направлен к точке 2. Из точки 2 откладывается вектор напряжения на емкости, он отстает от вектора тока на 90° и проводится параллельно вектору \dot{U}_L с небольшим смещением. Конец вектора \dot{U}_{c} направлен к точке 3. После построения диаграммы напряжений на элементах схемы необходимо провести вектор между точками 0 и 3. Конец полученного вектора должен быть направлен в точку 3, амплитуда полученного вектора (в выбранном масштабе напряжений) должна соответствовать действующему значению напряжения источника ЭДС Е, а фаза равняться ф₀.

При расчете разветвленных цепей переменного тока могут применяться любые методы, используемые для расчета электрических цепей постоянного тока. Чаще всего применяют метод последовательных преобразований или ме-
тод контурных токов. Рассмотрим пример расчета разветвленной цепи переменного тока (рис. 4. 4) методом контурных токов. В цепи действует ЭДС $e(t) = F : sin(\omega t + 90^\circ) \rightarrow$

$$\Rightarrow \dot{E} = E \cdot e^{j90^\circ} = \frac{E_m}{E_m} \cdot e^{j90^\circ} = iE$$

 $\sqrt{2}$

Начальная фаза источника ЭДС равна 90°, то есть при расчете значение напряжения будет иметь только мнимую составляющую. Уравнения для контурных токов в комплексной форме будут иметь вид:



Рис. 4. 4. Пример разветвленной электрической цепи переменного тока

$$\begin{cases} \dot{I}_{11}(R_1 + R_2 - \frac{j}{\omega C_1} + j\omega L_1) - \dot{I}_{22}(R_2 - \frac{j}{\omega C_1}) = \dot{E}, \\ \dot{I}_{22}(R_2 + R_3 + j\omega L_2 - \frac{j}{\omega C_1} - \frac{j}{\omega C_2}) - \dot{I}_{11}(R_2 - \frac{j}{\omega C_1}) = 0. \end{cases}$$
(4.15)

Из этих уравнений выразим контурные токи, заменив сопротивления всех элементов и источника ЭДС их численными значениями. Здесь приведем решение в общем виде:

$$\begin{vmatrix} \dot{I}_{22} = \frac{\dot{I}_{1l}(R_2 - \frac{j}{\omega C_l})}{R_2 + R_3 + j(\omega L_2 - \frac{l}{\omega C_l} - \frac{l}{\omega C_2})} = I_{22}e^{j\phi_{22}}, \\ \dot{I}_{11} = \frac{\dot{E}}{R_1 + R_2 + j(\omega L_l - \frac{l}{\omega C_l}) - \frac{(R_2 - \frac{j}{\omega C_l})^2}{R_2 + R_3 + j(\omega L_2 - \frac{l}{\omega C_l} - \frac{l}{\omega C_2})} = I_{1l}e^{j\phi_{1l}}, \quad (4.16)$$

По полученным контурным токам определяем токи в ветвях

$$\dot{I}_{1} = \dot{I}_{11} = I_{1} \cdot e^{j\varphi_{1}}, \ \dot{I}_{2} = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{22} = I_{2} \cdot e^{j\varphi_{2}}, \ \dot{I}_{3} = \dot{I}_{22} = I_{3} \cdot e^{j\varphi_{3}}$$

а по токам, протекающим в ветвях, рассчитываем напряжения на элементах

$$\dot{U}_{R_{1}} = R_{1} \cdot \dot{I}_{1}, \ \dot{U}_{R_{2}} = R_{2} \cdot \dot{I}_{2}, \ \dot{U}_{R_{3}} = R_{3} \cdot \dot{I}_{3}, \ \dot{U}_{L_{1}} = j\omega L_{1} \cdot \dot{I}_{1},$$
$$\dot{U}_{L_{2}} = j\omega L_{2} \cdot \dot{I}_{3}, \ \dot{U}_{C_{1}} = \frac{\dot{I}_{2}}{j\omega C_{1}}, \ \dot{U}_{C_{2}} = \frac{\dot{I}_{3}}{j\omega C_{2}}.$$

Для проверки правильности расчета необходимо построить векторную и топографическую диаграммы. Для построения векторной диаграммы откладывают векторы всех токов, протекающих в схеме из начала координат, и прове-



Рис. 4. 5. Векторная и топографическая диаграммы разветвленной электрической цепи переменного тока

ряют выполнение I закона Кирхгофа. Из векторной диаграммы, приведенной на рис. 4. 5, очевидно, что ток \dot{I}_1 равен сумме токов \dot{I}_2 и \dot{I}_2 .

Для проверки соблюдения II закона Кирхгофа строят топографическую диаграмму напряжений. Из точки 0 откладывают падение напряжения на индуктивности $L_I \dot{U}_{L_I}$, которое опережает ток \dot{I}_I на 90°. Из точки 1 выходят две параллельные ветви, т.е. необходимо отложить два вектора: вектор \dot{U}_{C_I} , отстающий от \dot{I}_2 на 90°, в точку 4, и вектор \dot{U}_{C_2} , отстающий от \dot{I}_3 на 90°, в точку 2. Из точки 2 откладывается вектор \dot{U}_{R_3} , совпадающий по направлению с \dot{I}_3 , в точку 3, а из точки 3 вектор \dot{U}_{L_2} , опережающий ток \dot{I}_3 на 90°, в точку 5. Из точки 4 откладывается век-

тор \dot{U}_{R_2} , совпадающий по направлению с \dot{I}_2 , в точку 5. При соблюдении II закона Кирхгофа векторы \dot{U}_{R_2} и \dot{U}_{L_2} должны сойтись в одной точке. Из точки 5 откладывается вектор \dot{U}_{R_1} , совпадающий по направлению с \dot{I}_1 , в точку 6. Для проверки соблюдения II закона Кирхгофа необходимо определить амплитуду и фазу вектора напряжения между точками 0 и 6. Напряжение между точками 0 и 6 носит комплексный характер и равно напряжению источника ЭДС, т.е. II закон Кирхгофа выполняется.

2. Методика выполнения работы

В исследуемых электрических цепях действует напряжение вида $e(t) = E_m \cdot sin\omega t$, т.е. начальная фаза источника ЭДС равна нулю.

Измерение фазы напряжений на элементах осуществляется с использованием двух каналов осциллографа в режиме измерения постоянного и переменного напряжений (DC). Первый канал осциллографа подключается к источнику ЭДС, а второй к элементу, который подключен к заземляющему контакту (так как заземление осциллографа соединено с заземлением стенда). Масштаб по шкале напряжения 2 В на обоих каналах, масштаб по шкале времени 500 мкс. Для измерения фазы необходимо совместить оси времени обоих каналов (курсоры, указывающие нулевое значение сигнала в левой части экрана, должны совместиться). Курсорами в режиме «ВРЕМЯ» отметить ближайшие точки пе-



Рис. 4. 6. Диаграммы, поясняющие определение знака фазы исследуемого напряжения

ресечения сигналов первого и второго каналов с нулевым уровнем (рис. 4. 6, а, б). Фаза сигнала в радианах определяется как

$$\varphi = t_c \cdot \omega, \tag{4.17}$$

где t_c – время смещения между сигналами первого и второго каналов в секундах, ω – циклическая частота источника ЭДС [paд/c].

В случае когда сигнал на исследуемом элементе опережает сигнал на источнике ЭДС (рис. 4. 6, а), фазу необходимо учитывать с положительным знаком. А в случае когда сигнал на источнике ЭДС опережает сигнал на исследуемом элементе (рис. 4. 6, б) – с отрицательным.

Амплитудные значения напряжений на элементах исследуемых электрических цепей измеряются осциллографом в соответствии с рис. 4. 6, а. Курсорами в режиме «НАПРЯЖЕНИЕ» отмечается минимальное и максимальное значения сигнала, искомая величина определяется как:

$$U_m = \Delta U/2. \tag{4.18}$$

Перед выполнением работы составить отчет, который должен содержать краткие элементы теории, все исследуемые схемы, таблицы и расчеты, указанные в программе работы. Схемы и таблицы должны быть выполнены карандашом и в соответствии с требованиями ЕСКД.

Студент, не подготовивший отчет, к выполнению лабораторной работы не допускается.

3. Программа работы

Установить на выходе генераторов сигналов специальной формы синусоидальный сигнал амплитудой $U_m=5$ В, напряжением смещения – 0 В, асимметрией – 50 % и частотой f=200 Гц.

1. Исследование неразветвленной электрической цепи переменного тока.

1.1. Собрать схему неразветвленной электрической цепи переменного тока, соединенной в последовательности согласно рис. 4. 7, а. Измерить амплитуду напряжения источника ЭДС (точка 1), амплитуду напряжения на сопротивле-



Рис. 4. 7. Последовательности соединения элементов исследуемой неразветвленной электрической цепи

нии *R2* (точка 2) и временной сдвиг между ними. Полученные данные занести в табл. 4.1.

1.2. Собрать схему неразветвленной электрической цепи переменного тока, соединенной в последовательности согласно рис. 4. 7, б. Измерить амплитуду напряжения на индуктивности *L1* (точка 2) и временной сдвиг между напряжением на индуктивности и напряжением источника ЭДС. Полученные данные занести в табл. 4.1.

1.3. Собрать схему неразветвленной электрической цепи переменного тока, соединенной в последовательности согласно рис. 4. 7, в. Измерить амплитуду напряжения на емкости *C1* (точка 2) и временной сдвиг между напряжением на емкости и напряжением источника ЭДС. Полученные данные занести в табл. 4.1.

1.4. Определить амплитуду и фазу тока, протекающего в цепи, и фазы напряжений на элементах в радианах и градусах в соответствии с методикой выполнения работы. Полученные данные занести в табл. 4.1.

1.5. По данным табл. 4.1 записать мгновенные значения напряжений на всех элементах и тока в цепи, а также комплексные действующие значения напряжений на элементах и тока в цепи в показательной и тригонометрической формах для измеренных значений.

1.6. Построить векторную диаграмму тока и топографическую диаграмму напряжений для комплексных амплитудных значений, используя схему в последовательности рис. 4. 7, а.

1.7. **При подготовке отчета рассчитать** комплексные амплитудные значения напряжений на элементах и тока в цепи для схемы рис. 4. 7, а. При расчете учитывать, что в цепи действует синусоидальное напряжение $e(t) = 5 \cdot sin\omega t$ с частотой f=200 Гц. Номиналы элементов взять из приложения 1. Полученные данные занести в табл. 4.1.

2. Исследование разветвленной электрической цепи переменного тока.

2.1. Собрать схему разветвленной электрической цепи переменного тока, соединенной в последовательности согласно рис. 4. 8, а. Измерить амплитуду напряжения источника ЭДС (точка 1), амплитуду напряжения на сопротивлении *R1* (точка 2) и временной сдвиг между ними. Полученные данные занести в табл. 4.2.

| | | | Tab | блица 4.1 | | | |
|--|-----------------------------|----|-----|-----------|--|--|--|
| Изананузмая раниция | Элементы электрической цепи | | | | | | |
| исследуемая величина | R2 | Ll | CI | e(t) | | | |
| Амплитудное значение напряжения (расч.) | | | | | | | |
| Амплитудное значение напряжения (измер.) | | | | | | | |
| Время смещения [мс] | | | | | | | |
| Фаза напряжения [градусы] (расч.) | | | | | | | |
| Фаза напряжения [градусы] (измер.) | | | | | | | |
| Фаза напряжения [радианы] (измер.) | | | | | | | |
| Амплитудное значение тока (расч.) | | | | | | | |
| Амплитудное значение тока (измер.) | | | | | | | |
| Фаза тока [градусы] (расч.) | | | | | | | |
| Фаза тока [градусы] (измер.) | | | | | | | |

2.2. Собрать схему разветвленной электрической цепи переменного тока, соединенной в последовательности согласно рис. 4. 8, б. Измерить амплитуду напряжения на емкости *C1* (точка 2) и временной сдвиг между напряжением на емкости и напряжением источника ЭДС. Полученные данные занести в табл. 4.2.

2.3. Собрать схему разветвленной электрической цепи переменного тока, соединенной в последовательности согласно рис. 4. 8, в. Измерить амплитуду на-



Рис. 4. 8. Последовательности соединения элементов исследуемой разветвленной электрической цепи

пряжения на емкости *C2* (точка 2) и временной сдвиг между напряжением на емкости и напряжением источника ЭДС. Измерить амплитуду напряжения на сопротивлении *R2* (точка 3) и временной сдвиг между напряжением на сопротивлении и напряжением источника ЭДС. Полученные данные занести в табл. 4.2.

2.4. Собрать схему разветвленной электрической цепи переменного тока, соединенной в последовательности согласно рис. 4. 8, г. Измерить амплитуду напряжения на индуктивности *L2* (точка 2) и временной сдвиг между напряжением на индуктивности и напряжением источника ЭДС. Полученные данные занести в табл. 4.2.

2.5. Определить амплитуды и фазы токов, протекающих в цепи, и фазы напряжений на элементах в радианах и градусах в соответствии с методикой выполнения работы. Полученные данные занести в табл. 4.2.

2.6. По данным табл. 4.2 записать мгновенные значения напряжений на всех элементах и тока в цепи, а также комплексные действующие значения напряжений на элементах и тока в цепи в показательной и тригонометрической формах для измеренных значений.

2.7. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений для комплексных амплитудных значений, используя схему в последовательности рис. 4. 8, а.

2.8. При подготовке отчета рассчитать комплексные амплитудные значения напряжений на элементах и токов в цепи для схемы рис. 4. 8, а. При расчете учитывать, что в цепи действует синусоидальное напряжение $e(t) = 5 \cdot sin\omega t$ с частотой f=200 Гц. Номиналы элементов взять из приложения 1. Полученные данные занести в табл. 4.2.

3. Провести анализ полученных результатов.

Таблица 4.2

| Исспелуемая величина | | Элементы электрической цепи | | | | | | | |
|--|-------------|-----------------------------|----|-----------|-----------|----|--|--|--|
| исследуемая величина | <i>e(t)</i> | RI | Cl | <i>C2</i> | <i>R2</i> | L2 | | | |
| Амплитудное значение напряжения (расч.) | | | | | | | | | |
| Амплитудное значение напряжения (измер.) | | | | | | | | | |
| Время смещения [мс] | | | | | | | | | |
| Фаза напряжения [градусы] (расч.) | | | | | | | | | |
| Фаза напряжения [градусы] (измер.) | | | | | | | | | |
| Фаза напряжения [радианы] (измер.) | | | | | | | | | |
| Амплитудное значение тока (расч.) | | | | | | | | | |
| Амплитудное значение тока (измер.) | | | | | | | | | |
| Фаза тока [градусы] (расч.) | | | | | | | | | |
| Фаза тока [градусы] (измер.) | | | | | | | | | |

4. Контрольные вопросы

1. Почему к цепям синусоидального переменного тока можно применять символический метод расчета?

2. Что такое символический метод расчета?

3. Как осуществляется переход от дифференциальных уравнений, описывающих схему, к алгебраическим?

4. Какие способы применимы при расчете цепей синусоидального переменного тока?

5. Как связаны векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений с законами Кирхгофа?

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы – изучение процессов, протекающих в электрических цепях, при возникновении резонансных явлений.

1. Общие сведения

Резонансом называется такой режим работы электрической цепи, содержащей индуктивные и емкостные элементы, когда сдвиг фазы между током \dot{I} и напряжением \dot{E} на входе цепи будет равен нулю ($\phi=0$). При этом эквивалентное сопротивление всей цепи (или проводимость) будет активным, хотя реактивные сопротивления (или проводимости) отдельных участков цепи будут иметь значения, отличные от 0.



Рис. 5. 1. Последовательный колебательный контур

Различают резонанс напряжений при последовательном и резонанс токов при параллельном соединении элементов *R*, *L*, *C*.

Резонанс напряжений. Резонанс напряжений возникает в электрической цепи с последовательным соединением индуктивности, емкости и сопротивления (рис. 5. 1). Условие последовательного резонанса: мнимая часть входного сопротивления цепи равна 0 ($Jm\{\dot{Z}\}=0$). Полное комплексное сопротивление цепи определяется как

$$\dot{Z} = R + jX = R + j(X_L - X_C) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right).$$



Рис. 5. 2. Зависимость реактивных сопротивлений последовательного колебательного контура от частоты

Реактивная (мнимая) часть сопротивления цепи $X = \omega L - l/\omega C$

является функцией частоты. График зависимости X от ω показан на рис. 5. 2. Как видно из данной зависимости, до точки резонанса реактивная часть сопротивления цепи носит емкостный характер, а после точки резонанса – индуктивный.

На резонансной частоте ω_p мнимая часть сопротивления цепи будет равна нулю: $Jm\{\dot{Z}(\omega_p)\}=0$,

$$\omega_n L - 1/\omega_n C = 0$$

Полное сопротивление цепи $\dot{Z} = R$ носит чисто активный характер и принимает минимальное

значение, а ток в цепи $\dot{I} = \dot{E}/R$ – максимальное. При резонансе реактивное сопротивление индуктивности $X_L = \omega_p L$ оказывается равным реактивному сопротивлению емкости $X_C = 1/\omega_p C$. Из этого условия определяется резонансная частота колебательного контура (формула Томсона) $\omega_p = 1/\sqrt{LC}$.

Значение реактивных сопротивлений индуктивности и емкости на резонансной частоте называют характеристическим сопротивлением р

$$\rho = \omega_p L = \frac{L}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \rho = 1/\omega_p C = \frac{\sqrt{LC}}{C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

При последовательном резонансе напряжения на индуктивности и емкости равны по величине и противоположны по знаку

$$U_L = X_L I = \frac{\rho}{R} E$$
, $U_C = X_C I = \frac{\rho}{R} E$.

Величина $Q=\rho/R$ называется добротностью контура. Она показывает, во сколько раз напряжение на реактивных элементах L и C превышает амплитуду



Рис. 5. 3. Векторнотопографическая диаграмма последовательного колебательного контура для режима резонанса напряжений источника ЭДС Е. Превышение в Q раз напряжениями U_L и U_C напряжения источника ЭДС достигается за счет периодического обмена энергией между индуктивностью и емкостью. Превышение напряжения на реактивных элементах над напряжением питания имеет место при условии $R < \rho$.

Векторно-топографическая диаграмма последовательного резонансного контура для режима резонанса представлена на рис. 5. 3.

Резонанса можно достичь, изменяя

или частоту приложенного к электрической цепи напряжения, или индуктивность катушки, или емкость конденсатора.

Электрические цепи, в которых возникает периодический обмен энергией между реактивными элементами (колебательные системы), принято описывать частотной характеристикой (резонансной кривой). В случае последовательного колебательного контура под резонансной кривой понимают зависимость амплитуды тока, протекающего в контуре, от частоты (амплитудночастотную характеристику – АЧХ):



Рис. 5. 4. Резонансные кривые последовательного колебательного контура

$$\dot{I}(\omega) = \frac{\dot{E}}{R + j(\omega L - 1/\omega C)} = \frac{\dot{I}_p}{1 + jQ(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)}.$$

Таким образом, АЧХ (резонансная кривая) последовательного колебательного контура описывается выражением

$$\left|\dot{I}(\omega)\right| = I(\omega) = \frac{I_p}{\sqrt{I + Q^2 (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}}$$

Нормированные к максимальному току резонансные кривые для двух значений добротности показаны на рис. 5. 4. Для резонансной характеристики вводят понятие ширины полосы пропускания $\Delta \omega$, под которой понимается расстояние между точками пересечения резонансной кривой с уровнем, составляющим величину $1/\sqrt{2} \approx 0.707$ от максимального значения.

Полоса пропускания контура зависит от добротности контура $\Delta \omega = \omega_p / Q$, чем выше добротность, тем уже полоса пропускания, а резонансная характеристика становится более «острой».

Зависимость сдвига фазы между током I и напряжением E называют фазочастотной характеристикой (ФЧХ). ФЧХ последовательного контура является зависимость фазы входного сопротивления от частоты:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}(X/R) = \operatorname{arctg}\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right)$$

Форма ФЧХ для двух значений добротности показана на рис. 5. 5, чем выше добротность, тем более «прямоугольной» становится фазочастотная характеристика.

Зависимости амплитуды напряжения на сопротивлении, индуктивности и емкости от частоты приведены на рис. 5. 6. До точки резонанса напряжение на



Рис. 5. 5. Фазочастотная характеристика последовательного колебательного контура



Рис. 5. 6. Зависимости амплитуды напряжения на сопротивлении, индуктивности и емкости в последовательном колебательном контуре от частоты

емкости больше, чем напряжение на индуктивности (сопротивление схемы носит емкостный характер), а после точки резонанса напряжение на индуктивности больше, чем напряжение на емкости (сопротивление схемы носит индуктивный характер). Форма кривой напряжения на сопротивлении совпадает с резонансной кривой колебательного контура. В точке резонанса значения напряжений на емкости и индуктивности равны между собой, а напряжение на сопротивлении достигает максимума и равно E.

Резонанс токов. Резонанс токов возникает в схеме, содержащей две параллельные ветви с реактивными элементами различного характера. Условие параллельного резонанса: мнимая часть входной проводимости контура равна $0 (Jm{\dot{Y}_{ex}} = 0)$.

При параллельном соединении R, L, C (рис. 5. 7) ток в цепи определяется выражением $\dot{I} = \dot{E} \cdot \dot{Y}$, где \dot{Y} - полная комплексная проводимость цепи, которая определяется как

$$\dot{Y} = G - jB = G - j(B_L - B_C) = G - j\left(\omega C - \frac{l}{\omega L}\right).$$

Резонанс возникает, когда напряжение и ток на входе цепи совпадают по фазе ($\varphi = \theta$), а эквивалентная проводимость всей цепи – чисто активная ($\dot{Y} = G$), то есть на резонансной частоте ω_p реактивная проводимость B=0:



$$B = \omega_p C - \frac{l}{\omega_p L} = 0,$$

откуда

$$\omega_p C = \frac{l}{\omega_p L}, \ \omega_p^2 L C = l, \ \omega_p = l / \sqrt{LC}$$

Рис. 5. 7. Параллельный колебательный контур

Как мы видим последнее уравнение, определяющее условие резонанса, аналогично уравнению для последовательного резонанса.

При резонансе реактивная B=0. проводимость а полная проводимость цепи лостигает минимального значения $\dot{Y} = G$. Поэтому $\dot{I} = \dot{E} \cdot G$ ток в цепи оказывается наименьшим в отличие от резонанса при последовательном соединении, когда ток, наоборот, имел максимальное значение. Векторная диаграмма при резонансе в рассматриваемой цепи приведена на рис. 5. 8.



Так как вектор тока в общей ветви оказывается геометрической суммой векторов трех токов, два из которых \dot{I}_L и \dot{I}_C находятся в противофазе, то при резонансе возможны случаи, когда токи в индуктивности и в емкости могут превосходить, и иногда намного, суммарный ток в цепи \dot{I} . Поэтому резонанс при параллельном соединении называют резонансом токов.

Превышение токов в реактивных элементах цепи над суммарным током цепи имеет место при условии

$$G << \omega_p C = \frac{l}{\omega_p L} = \sqrt{C/L} = \gamma,$$

где $\gamma = l/\rho$ – волновая проводимость контура. Величина $Q = \gamma/G = R/\rho$ является добротностью контура. Она определяет кратность превышения тока в индуктивности и в конденсаторе над суммарным током при резонансе. В случае параллельного соединения реактивных элементов при резонансе в любой момент времени $i_L(t) = -i_C(t)$, напряжение $\dot{U} = \dot{E}$ является общим для всех элементов. В цепи возникает периодический обмен энергией между индуктивностью и емкостью. Энергия переходит из конденсатора в катушку и обратно, не обмениваясь с источником ЭДС. Источник энергии расходует энергию только в ветви с проводимостью и емкостью и емкостью и емкостью и емкостью и емкостью и емкостью при резонансе ничем не ограничен (идеальный контур) и будет протекать бесконечно, даже при отключении источника энергии.

Рассмотрим схему параллельного колебательного контура, где сопротивление r отражает потери в индуктивности (рис. 5. 9).

Найдем полную комплексную проводимость параллельного колебательного контура (рис. 5. 9):

$$\begin{split} \dot{Y} &= j\omega C + \frac{I}{r+j\omega L}, \\ \dot{Y} &= j\omega C + \frac{r-j\omega L}{(r+j\omega L)\cdot(r-j\omega L)}, \end{split}$$



Рис. 5. 9. Параллельный колебательный контур с потерями энергии

$$\dot{Y} = \frac{r}{r^2 + (\omega L)^2} + j(\omega C - \frac{\omega L}{r^2 + (\omega L)^2}),$$

$$\dot{Y} = G - jB.$$

По условию резонанса мнимая часть полной комплексной проводимости цепи (реактивная проводимость) должна равняться нулю B = 0. Таким образом, получаем

$$\omega_p C = \frac{\omega_p L}{r^2 + \omega_p^2 L^2}.$$

При резонансе сопротивление реактивных элементов значительно больше активного сопротивления, исходя из этого условия, пренебрегаем активными потерями в формуле и получаем выражение для резонансной частоты параллельного колебательного контура $\omega_p = 1/\sqrt{LC}$. Оно имеет такой же вид, что и для последовательного контура. Характеристическое (волновое) сопротивление также имеет тот же вид: $\rho = \omega_p L = l/\omega_p C = \sqrt{L/C} >> r$.

В качестве резонансной характеристики параллельного контура рассматривают амплитудно-частотную характеристику зависимости комплексного входного сопротивления контура от частоты. Определим сопротивление параллельного колебательного контура с учетом выражений для его резонансной частоты и характеристического сопротивления:

$$\dot{Z}(\omega) = \frac{(r+j\omega L) \cdot \frac{l}{j\omega C}}{r+j\omega L + \frac{l}{j\omega C}} = \frac{\rho^2 - j\rho r \frac{\omega_p}{\omega}}{r+j\rho \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega}\right)}$$

На частотах, близких к резонансу $\rho >> r$, можно пренебречь мнимой частью числителя. Тогда

$$\dot{Z}(\omega) = \frac{\rho^2}{r + j\rho\left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega}\right)},$$

учитывая, что добротность контура $Q = \rho/r$, получаем

$$\dot{Z}(\omega) = \frac{r_{\alpha}}{l + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega}\right)},$$

где $r_{\alpha} = \rho^2 / r = \rho Q$ – сопротивление контура на резонансной частоте.

Таким образом, выражение для полного сопротивления контура имеет вид:



Рис. 5. 10. Резонансная кривая параллельного колебательного контура



Рис. 5. 11. Фазочастотная характеристика параллельного колебательного контура

$$\dot{Z}(\omega) = \frac{r_{\alpha}}{I + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega}\right)} = \frac{r_{\alpha}}{\sqrt{1 + Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega}\right)^2}} e^{-arctg\left(Q\left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega}\right)\right)}.$$

Резонансная кривая (рис. 5. 10) параллельного контура описывается формулой для модуля, а фазочастотная характеристика (рис. 5. 11) – формулой для фазы комплексного входного сопротивления контура. На резонансной частоте сопротивление параллельного контура оказывается значительным, а ток в контуре \dot{I}_{K} в Q раз превышает ток \dot{I} , поступающий в контур от генератора тока. Превышение контурного тока \dot{I}_{K} над внешним током \dot{I} объясняется периодическим обменом энергией между индуктивностью и емкостью. Энергия, приобретаемая от внешнего источника, расходуется только на компенсацию потерь в сопротивлении контура r.

2. Методика выполнения работы

Для получения временных диаграмм напряжения используются два кана-

ла осциллографа: Канал 1 подключается к исследуемому элементу (точка 1 на схемах рис. 5. 13), а Канал 2 – к генератору (точка 2 на схемах рис. 5. 13). Временные диаграммы напряжения на элементах зарисовывать, учитывая, что начальная фаза напряжения генератора равна нулю (рис. 5. 12). На осциллографе необходимо выставить масштаб по оси времени 500 мкс/дел, а по оси напряжения 2 В/дел. На осях временных диаграмм необходимо



Рис. 5. 12. Типичная временная диаграмма, наблюдаемая на осциллографе

обозначить измеряемые величины, их размерность и масштаб.

Для снятия АЧХ необходимо подключить Канал 1 осциллографа к исследуемому элементу. Перевести курсоры в режим измерения «АВТО», в меню «Измерения» установить «Канал 1 напряжение» тип «V_{max}». С помощью органов управления поместить исследуемый сигнал в центральную часть экрана. Регулировкой чувствительности по напряжению добиться, чтобы размах сигнала составлял порядка 2/3 экрана. Регулировкой длительности развертки добиться отображения на экране 2÷3 периодов сигнала. Величина амплитудного значения напряжения будет отображаться в правой части экрана под пиктограммой типа измеряемой величины. При изменении частоты измеряемого сигнала корректировать с помощью чувствительности по напряжению и длительности развертки указанные выше пропорции сигнала на экране. Частоту менять на генераторе от 20 до 420 Гц с шагом 40 Гц.

Перед выполнением работы составить отчет, который должен содержать краткие элементы теории, *все исследуемые схемы, таблицы и расчеты, указанные в программе работы.* Схемы и таблицы должны быть выполнены карандашом и в соответствии с требованиями ЕСКД.

Студент, не подготовивший отчет, к выполнению лабораторной работы не допускается.

3. Программа работы

Для двух исследуемых вариантов схем (см. таблицу) рассчитать резонансную частоту контура (ω_p, f_p), волновое сопротивление ρ и добротность Q. Расчет привести в отчете, а полученные данные занести в соответствующие графы таблицы.

При проведении исследований в качестве сопротивления R использовать резистор R1 номиналом 750 Ом (приложение 1), в качестве емкости C – конденсатор C1 номиналом 1 мкФ, в качестве индуктивности L – индуктивность L1 номиналом 1 Гн.

1. На лабораторном макете собрать схему последовательного колебательного контура согласно рис. 5.13, а.

1.1. Выставить на генераторе синусоидальное напряжение с амплитудой U_m =5 В (напряжение смещения – 0 В, асимметрия – 50 %) и частотой $f=f_p$. Подключить первый канал осциллографа к резистору R (точка 1), а второй – к генератору (точка 2). Зарисовать временные диаграммы напряжения на сопротивлении и генераторе.

1.2. Установить на генераторе частоту $f=0,5 f_p$. Зарисовать временные диаграммы напряжения на сопротивлении и генераторе на отдельной осциллограмме.

1.3. Установить на генераторе частоту f=1,5 f_p . Зарисовать временные диаграммы напряжения на сопротивлении и генераторе на отдельной осциллограмме.



Рис. 5. 13. Схемы для наблюдения временных диаграмм на элементах последовательного колебательного контура: а – на сопротивлении, б – на индуктивности, в – на емкости

2. На лабораторном макете собрать схему последовательного колебательного контура согласно рис. 5.13, б.

2.1. Подключить первый канал осциллографа к индуктивности L (точка 1), а второй – к генератору (точка 2). Установить на генераторе частоту $f=f_p$. Зарисовать временные диаграммы напряжения на индуктивности и генераторе на отдельной осциллограмме.

2.2. Установить на генераторе частоту $f=0,5 f_p$. Зарисовать временные диаграммы напряжения на индуктивности и генераторе на отдельной осциллограмме.

2.3. Установить на генераторе частоту $f=1,5 f_p$. Зарисовать временные диаграммы напряжения на индуктивности и генераторе на отдельной осциллограмме.

3. На лабораторном макете собрать схему последовательного колебательного контура согласно рис. 5.13, в.

3.1. Подключить первый канал осциллографа к емкости C (точка 1), а второй – к генератору (точка 2). Установить на генераторе частоту $f=f_p$. Зарисовать временные диаграммы напряжения на емкости и генераторе на отдельной осциллограмме.

3.2. Установить на генераторе частоту f=0,5 f_p . Зарисовать временные диаграммы напряжения на емкости и генераторе на отдельной осциллограмме.

3.3. Установить на генераторе частоту f=1,5 f_p . Зарисовать временные диаграммы напряжения на емкости и генераторе на отдельной осциллограмме.

4. Исследование амплитудно-частотных характеристик последовательного колебательного контура.

4.1. В схеме последовательного колебательного контура, собранной согласно рис. 5.13, в, при сопротивлении R=RI=750 Ом снять зависимость амплитудного значения напряжения на емкости U_{mC} от частоты изменения напряжения источника питания (АЧХ). Полученные результаты занести в соответствующие графы таблицы.

4.2. Установить в схеме рис. 5.13, в сопротивление R=500 Ом (для этого сопротивления R1 и R2 на лабораторном стенде необходимо соединить параллельно). Снять АЧХ U_{mC} . Полученные результаты занести в соответствующие графы таблицы. 4.3. На лабораторном макете собрать схему последовательного колебательного контура согласно рис. 5.13, а при R=RI=750 Ом. Снять АЧХ U_{mR} . Полученные результаты занести в соответствующие графы таблицы.

4.4. Установить в схеме рис. 5.13, а сопротивление R=500 Ом. Снять АЧХ U_{mR} . Полученные результаты занести в соответствующие графы таблицы.

4.5. На лабораторном макете собрать схему последовательного колебательного контура согласно рис. 5.13, б при R=RI=750 Ом. Снять АЧХ U_{mL} . Полученные результаты занести в соответствующие графы таблицы.

4.6. Установить в схеме рис. 5.13, б сопротивление *R*=500 Ом. Снять АЧХ *U_{mL}*. Полученные результаты занести в соответствующие графы таблицы.

4.7. Рассчитать значения токов для всех точек АЧХ: *I*= *U*_{*mR*}/R. Полученные результаты занести в соответствующие графы таблицы.

4.8. По полученным данным построить АЧХ U_{mR} , U_{mL} и U_{mC} . Все три зависимости для каждой добротности построить на одном графике.

5. Построить резонансные кривые для двух значений добротности на одном графике. В качестве резонансной характеристики использовать АЧХ тока в контуре. Графически определить резонансную частоту f_p , полосу пропускания Δf и добротность Q. Полученные результаты занести в соответствующие графы таблицы.

6. Провести анализ полученных результатов.

| | R=75 | 0 Ом, L= | 1 Гн, С=. | l мкФ, | $R=500 \ O$ м, $L=1 \ Г$ н, $C=1 \ мк \Phi$, | | | | | |
|---|--------------|-------------|-------------|-----------|---|-------------|-------------|-------|--|--|
| | | $R_{l}=l$ | 00 Ом | | <i>R</i> г=100 <i>О</i> м | | | | | |
| | | Pac | іетные п | араметр | ы резона | нса | | | | |
| ω_p , pad/c | | | | | | | | | | |
| <i>f</i> _p , Гц | | | | | | | | - | | |
| р, Ом | | | | | | | | | | |
| Q | | | | | | | | | | |
| Построение амплитудно-частотных характеристик | | | | | | | | | | |
| <i>f,</i> Гų | U_{mR} , B | U_{mL}, B | U_{mC}, B | I, мА | U_{mR} , B | U_{mL}, B | U_{mC}, B | I, мА | | |
| 20 | | | | | | | | | | |
| 60 | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | |
| 140 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| 420 | | | | | | | | | | |
| | Гр | афическо | е определ | ление пар | аметров | резонано | ca | | | |
| <i>f</i> _p , Гц | | | | | | | | | | |
| $\Delta f_p, \Gamma q$ | | | | | | | | - | | |
| 0 | | | | | | | | | | |

Последовательный колебательный контур

4. Контрольные вопросы

- 1. Что такое резонанс?
- 2. Сформулируйте условие резонанса токов.
- 3. Сформулируйте условие резонанса напряжений.
- 4. Что такое резонансная частота? Как она определяется?

5. Что такое характеристическое (волновое) сопротивление и проводимость? Как они определяются?

- 6. Что такое добротность контура? Как она определяется?
- 7. Что такое АЧХ?
- Что такое ΦЧХ?

9. Что является резонансной кривой последовательного, а что параллельного колебательного контура?

10. Как с помощью АЧХ определить резонансную частоту?

11. Как с помощью АЧХ определить полосу пропускания?

Лабораторная работа № 6

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы - изучение параметров и характеристик низковольтных трансформаторов, используемых в электрических цепях переменного синусоидального тока.

1. Общие сведения

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно-связанных обмотки и предназначенное для преобразования переменного тока (или напряжения) одной обмотки (первичной) в переменный ток (или напряжение) другой обмотки (вторичной) посредством электромагнитной индукции.

1.1. Магнитно-связанные катушки

Простейшей катушкой индуктивности является провод, намотанный на цилиндрическую поверхность (соленоид). При протекании через соленоид тока вокруг витков обмотки создается магнитное поле, вектор магнитной индукции В которого направлен по часовой стрелке относительно направления протекания тока. Внутри катушки линии магнитной индукции от каждого витка обмотки суммируются и направлены параллельно оси соленоида. В случае соленоида без магнитопровода (рис. 6. 1, а) линии магнитной индукции начинают отклоняться от оси на границах начала и конца обмотки. При помещении внутрь об-



Рис. 6. 1. Распределение линий магнитной индукции в соленоиде без магнитопровода – а и в соленоиде с магнитопроводом – б

мотки сердечника из ферромагнитного материала линии магнитной индукции, вызываемые протекающим через обмотку током, концентрируются внутри магнитопровода на всем его протяжении (рис. 6. 1, б). В случае намотки двух (или нескольких) обмоток на один сердечник при протекании через каждую из них переменного тока будет возникать магнитный поток (самоиндукция), вызывающий в остальных обмотках ЭДС взаимной индукции. Такие катушки называются магнитно-связанными и характеризуются взаимной магнитной индукцией. Взаимная магнитная индукция обозначается M, измеряется в генри [Гн] и имеет свойства индуктивности $\dot{X}_M = j\omega M$. На схемах магнитная связь между элементами обозначается дугой, с обеих сторон оканчивающейся стрелками.

Существует согласное (рис. 6. 2, а) и встречное (рис. 6. 3, а) включение магнитно-связанных катушек. При согласном включении токи в катушках втекают в одноименные зажимы, рис. 6. 2, б (на схемах обозначаются точками либо звездочками), и создают магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции, направленные в одну сторону (согласованные). При встречном включении токи в катушках втекают в разноименные зажимы (рис. 6. 3, б) и создают



Рис. 6. 2. Согласное включение магнитно-связанных катушек - а и его изображение на схеме – б



Рис. 6. 3. Встречное включение магнитно-связанных катушек - а и его изображение на схеме – б



Рис. 6. 4. Согласное последовательное соединение двух магнитносвязанных катушек



Рис. 6. 5. Встречное последовательное соединение двух магнитносвязанных катушек

магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции, направленные в противоположные стороны (встречные).

При согласном последовательном соединении двух магнитно-связанных катушек (рис. 6. 4) ЭДС взаимной индукции складывается с ЭДС самоиндукции, а реактивное сопротивление схемы увеличивается:

$$\begin{split} \dot{E} &= \dot{I} \cdot R_1 + \dot{I} \cdot j\omega L_1 + \dot{I} \cdot j\omega M + \dot{I} \cdot j\omega L_2 + \dot{I} \cdot j\omega M + \dot{I} \cdot R_2, \\ \dot{E} &= \dot{I} \cdot (R_1 + R_2 + j(\omega L_1 + \omega L_2 + 2\omega M)), \\ \dot{Z} &= \dot{E} / \dot{I} = (R_1 + R_2 + j(\omega L_1 + \omega L_2 + 2\omega M)). \end{split}$$

$$(6.1)$$

При встречном последовательном соединении двух магнитно-связанных катушек (рис. 6. 5) ЭДС взаимной индукции вычитается из ЭДС самоиндукции, а реактивное сопротивление схемы уменьшается:

$$\dot{E} = \dot{I} \cdot R_1 + \dot{I} \cdot j\omega L_1 - \dot{I} \cdot j\omega M + \dot{I} \cdot j\omega L_2 - \dot{I} \cdot j\omega M + \dot{I} \cdot R_2,$$

$$\dot{E} = \dot{I} \cdot (R_1 + R_2 + j(\omega L_1 + \omega L_2 - 2\omega M)),$$

$$\dot{Z} = \dot{E} / \dot{I} = (R_1 + R_2 + j(\omega L_1 + \omega L_2 - 2\omega M)).$$

$$(6.2)$$

1.2. Трансформатор

Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения электроэнергии имеют силовые трансформаторы, посредством которых изменяют величину переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными. Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода – сердечника, выполненного из ферромагнитного материала, и двух обмоток (катушек индуктивности), расположенных на стержнях магнитопровода



трансформатора

(рис. 6. 6). На схемах магнитную связь между обмотками трансформатора обозначать не принято, показывают только начала обмоток. Линия между обмотками обозначает наличие магнитопровода.

Конструктивно магнитопровод трансформатора выполняется в виде сердечника П – образной, Ш – образной или тороидальной формы (рис. 6. 7). П –



тороидальный сердечник – в

образный и Ш – образный сердечники выполняются разъемными и в магнитопроводе может быть сформирован немагнитный зазор. Тороидальные сердечники выполняются неразъемными, однако в современной радиоэлектронике применяются материалы, в которых формируется распределенный немагнитных зазор. Если сердечник выполнен из материала с распределенным немагнитным зазором, то в условно-графическом обозначении трансформатора линия между первичной и вторичной обмоткой выполняется пунктиром. Наличие немагнитного зазора и возможность его регулировки позволяют изменять магнитные свойства сердечника.

Одна из обмоток трансформатора присоединена к источнику переменного напряжения $e_1(t)$, эту обмотку называют первичной. К другой обмотке подключен потребитель \dot{Z}_{μ} – ее называют вторичной (рис. 6. 8). Здесь L_1 и L_2 – индуктивность, а r_1 и r_2 – активное сопротивление первичной и вторичной обмоток. Взаимная магнитная индукция между первичной и вторичной обмотками равна М.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток $i_1(t)$, который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток $\Phi(t)$. Замыкаясь на магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС. В соответствии с законом электромагнитной индукции



Рис. 6. 8. Включение трансформатора в электрическую цепь

для любого замкнутого контура индуцированная ЭДС равна скорости изменения магнитного потока, проходящего через этот контур, взятого с отрицательным знаком. Количество таких контуров в обмотке равно числу витков. Исходя из этого:

$$u_1(t) = -w_1 \frac{d\Phi}{dt},\tag{6.3}$$

$$u_2(t) = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \qquad (6.4)$$

где *w*₁ и *w*₂ – число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Как видно из (6. 3) и (6. 4), соотношение между $u_1(t)$ и $u_2(t)$ определяется соотношением числа витков первичной и вторичной обмоток:

$$u_2(t)/u_1(t) = w_2/w_1.$$
 (6.5)

Основной характеристикой трансформатора является коэффициент трансформации – n. Если за коэффициент трансформации принять отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки ($n=w_1/w_2$), то при n<1- трансформатор повышающий (напряжение на вторичной обмотке больше, чем напряжение на первичной обмотке), а при n>1- трансформатор понижающий (напряжение на вторичной обмотке меньше, чем напряжение на вторичной обмотке меньше, чем напряжение на первичной обмотке). Соотношение, учитывая (6. 4) для действующих и амплитудных значений напряжения, можно записать

$$U_2/U_1 = U_{2m}/U_{1m} = w_2/w_1 = 1/n.$$
(6.6)

В случае использования идеального трансформатора (у которого отсутствует активное сопротивление обмоток и рассеивание магнитного потока) мощность в цепи первичной обмотки равна мощности в цепи вторичной обмотки:

$$p_1(t) = p_2(t),$$

$$u_1(t) \cdot i_1(t) = u_2(t) \cdot i_2(t),$$
(6.7)

где $p_1(t)$ и $p_2(t)$ – значение мгновенной мощности в первичной и вторичной обмотках, $i_1(t)$ и $i_2(t)$ – значение мгновенных токов в первичной и вторичной обмотках. Используя (6. 5 и 6. 6), можно записать

$$i_{2}(t) = \frac{u_{1}(t)}{u_{2}(t)} \cdot i_{1}(t) = n \cdot i_{1}(t),$$

$$i_{2}(t) / i_{1}(t) = n.$$
(6.8)

Таким образом, из (6. 6) и (6. 8) видно, что в случае повышающего трансформатора ток во вторичной обмотке меньше тока в первичной обмотке, а в случае понижающего трансформатора ток во вторичной обмотке больше тока в первичной обмотке.

В идеальном трансформаторе вся мощность вторичной обмотки рассеивается в нагрузке. С учетом этого и (6. 7) можно определить эквивалентное значение сопротивления нагрузки \dot{Z}'_{μ} , пересчитанное в цепь первичной обмотки:

$$\dot{I}_{1}^{2}(t) \cdot \dot{Z}_{\mu}^{\prime} = \dot{I}_{2}^{2}(t) \cdot \dot{Z}_{\mu},$$

$$\dot{Z}_{\mu}^{\prime} = \frac{\dot{I}_{2}^{2}(t)}{\dot{I}_{1}^{2}(t)} \cdot \dot{Z}_{\mu} = n^{2} \cdot \dot{Z}_{\mu}.$$
 (6.9)

Используя аналогичные преобразования, можно получить следующие соотношения:

$$R'_2 = n^2 \cdot R_2, \ L'_2 = n^2 \cdot L_2, \ C'_2 = C_2 / n^2,$$
 (6.10)

где R_2 , L_2 и C_2 – сопротивление, индуктивность и емкость, включенные в цепь вторичной обмотки, а R'_2 , L'_2 и C'_2 – их эквивалентные значения, пересчитанные в цепь первичной обмотки.

В трансформаторе с равным числом витков первичной и вторичной обмоток (коэффициентом трансформации n=1) воздействие тока первичной обмотки на вторичную эквивалентно воздействию тока вторичной обмотки на первичную. Так как трансформатор является устройством переменного тока, то к схемам с его использованием применим символический метод расчета. С учетом этого для схемы на рис. 6. 8 в случае, когда нагрузка носит только активный характер, можно записать систему уравнений

$$\begin{cases} \dot{I}_{1} \cdot r_{1} + \dot{I}_{1} \cdot j\omega L_{1} - \dot{I}_{2} \cdot j\omega M = \dot{E}, \\ \dot{I}_{2} \cdot r_{2} + \dot{I}_{2} \cdot R_{\mu} + \dot{I}_{2} \cdot j\omega L_{2} - \dot{I}_{1} \cdot j\omega M = 0. \end{cases}$$

$$(6.11)$$

Если в первое уравнение системы (6. 11) одновременно добавить и вычесть произведение $\dot{I}_1 \cdot j \omega M$, а во второе уравнение – произведение $\dot{I}_2 \cdot j \omega M$, то состояние системы не изменится:

$$\begin{cases} \dot{I}_{1} \cdot r_{1} + \dot{I}_{1} \cdot j\omega L_{1} - \dot{I}_{1} \cdot j\omega M + \dot{I}_{1} \cdot j\omega M - \dot{I}_{2} \cdot j\omega M = \dot{E}, \\ \dot{I}_{2} \cdot r_{2} + \dot{I}_{2} \cdot R_{\mu} + \dot{I}_{2} \cdot j\omega L_{2} - \dot{I}_{2} \cdot j\omega M + \dot{I}_{2} \cdot j\omega M - \dot{I}_{1} \cdot j\omega M = 0. \end{cases}$$
(6.12)

Преобразовав полученные выражения, получим систему уравнений

$$\begin{cases} \dot{I}_{1} \cdot r_{1} + \dot{I}_{1} \cdot j\omega \cdot (L_{1} - M) + j\omega M \cdot (\dot{I}_{1} - \dot{I}_{2}) = \dot{E}, \\ \dot{I}_{2} \cdot r_{2} + \dot{I}_{2} \cdot R_{\mu} + \dot{I}_{2} \cdot j\omega \cdot (L_{2} - M) + j\omega M \cdot (\dot{I}_{2} - \dot{I}_{1}) = 0, \end{cases}$$
(6.13)

которая описывает эквивалентную схему замещения трансформатора с коэффициентом трансформации n=1 (рис. 6. 9). В этой схеме L_1 - $M=L_{S1}$ и L_2 - $M=L_{S2}$ – индуктивности рассеивания первичной и вторичной обмоток соответственно. Индуктивность рассеивания обусловлена рассеиванием части магнитного потока трансформатора вне витков вторичной и первичной обмоток и является паразитным параметром трансформатора. Наличие индуктивности рассеивания и активное сопротивление обмоток приводит к тому, что КПД реальных трансформаторов составляет 0,9-0,98.

Если коэффициент трансформации n≠1, то элементы, входящие в цепь



Рис. 6. 9. Эквивалентная схема замещения трансформатора с коэффициентом трансформации *n*=1



Рис. 6. 10. Эквивалентная схема замещения трансформатора с коэффициентом трансформации *n*≠1

вторичной обмотки, необходимо пересчитать в цепь первичной обмотки с учетом соотношений (6. 10). В этом случае эквивалентная схема замещения трансформатора будет иметь вид рис. 6. 10. У идеального трансформатора активные сопротивления обмоток r_1 , r_2 и индуктивности рассеивания обмоток L_{SI} , L_{S2} равны нулю, а взаимная индукция $M \rightarrow \infty$. Его эквивалентная схема принимает вид рис. 6. 11.



Рис. 6. 11. Эквивалентная схема электрической цепи с идеальным трансформатором

Идеальный трансформатор, включённый между нагрузкой и источником ЭДС, изменяет величину нагрузки $\dot{Z}'_{\mu} = n^2 \cdot \dot{Z}_{\mu}$. Трансформаторы с такими свойствами используют для согласования выходного сопротивления источника сигнала с нагрузкой и называют согласующими.

У реальных трансформаторов $r_1 \neq r_2 \neq 0$, $L_{SI} \neq L_{S2} \neq 0$ и $M < \infty$. Соответственно их свойства отличаются от свойств идеального трансформатора и, в том числе зависят от частоты. Вид амплитудно-частотной характеристики трансформатора $K(\omega)=u_2(\omega)/u_1(\omega)$ показан на рис. 6. 12.

На низких частотах (при $\omega \rightarrow 0$) сопротивление взаимной индукции, чис-

ленно равное ωM , уменьшается, магнитная связь между обмотками ослабевает, и передача энергии из первичной обмотки во вторичную снижается. Для нахождения нижней граничной частоты ω_n при холостом ходе на выходе $(Z_n = \infty)$ и при выполнении условия $R_r >> r_1$ трансформатор можно представить в виде интегрирующей цепочки (рис. 6. 13, а). Постоянная времени для такой схемы равна $\tau_n = M/R_c$, откуда находим нижнюю граничную частоту:

$$\omega_{H} = \frac{I}{\tau_{H}} = \frac{R_{2}}{M}.$$
 (6.14)

На верхних частотах снижение коэффициента передачи трансформатора происходит из-за индуктивностей рассеяния L_{SI} и L_{S2} . Для этих частот эквивалентной схемой трансформатора является переходная цепочка с постоянной времени $\tau_e = (L_{SI} + n^2 \cdot L_{S2})/(n^2 \cdot R_{\mu} + R_{z})$



Рис. 6. 12. Амплитудно-частотная характеристика трансформатора



Рис. 6. 13. Эквивалентные схемы трансформатора: а – для нижних частот, б – для верхних частот



Рис. 6. 14. Подключение постоянного источника ЭДС в цепь первичной обмотки трансформатора – а и в цепь вторичной обмотки трансформатора – б

(рис.6. 13, б). Соответственно верхняя частота для такой схемы будет определяться как

$$\omega_{e} = \frac{L_{SI} + n^{2} \cdot L_{S2}}{n^{2} \cdot R_{\mu} + R_{z}}.$$
(6.15)

Трансформаторы, как правило, работают на фиксированной (рабочей) частоте ω_p . Параметры трансформатора $r_1, r_2, L_{S1}, L_{S2}, M$ технологически задают такими, чтобы на рабочей частоте ω_p коэффициент передачи $K(\omega_p)$ был близок к коэффициенту передачи идеального трансформатора.

Трансформатор является устройством переменного тока. Если через его первичную обмотку пропускать постоянный ток, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению ($d\Phi/dt=0$), а в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС. Поэтому трансформатор обеспечивает гальваническую развязку – постоянная составляющая напряжения и тока из цепи первичной обмотки не передается в цепь вторичной обмотки (рис. 6. 14, а):

$$i_{loful}(t) = i_l(t) + I_{const}, \ I_{const} = E_2 / r_l, \ i_2(t) = i_l(t) \cdot n$$

а постоянная составляющая напряжения и тока из цепи вторичной обмотки не передается в цепь первичной обмотки (рис. 6. 14, б):

$$i_{2obu}(t) = i_2(t) + I_{const}, I_{const} = E_2 / (r_2 + R_{\mu}), i_1(t) = i_2(t) / n$$

2. Методика выполнения работы

Исследуемый в работе трансформатор (приложение 1) содержит одну первичную обмотку и две вторичные обмотки – верхнюю и нижнюю, которые соединены между собой.

Для получения временных диаграмм напряжения используются два канала осциллографа: Канал 1 подключается к генератору (точка 1 на рис. 6.15), а Канал 2 – к исследуемому элементу (точка 2 на рис. 6.15). Временные диаграммы напряжения на элементах зарисовывать, учитывая, что начальная фаза напряжения генератора равна нулю. На осциллографе необходимо выставить масштаб по оси времени – 100 мкс/дел, а по оси напряжения – 2 В/дел. На осях временных диаграмм необходимо обозначить измеряемые величины, их размерность и масштаб.

Амплитудные значения напряжений на элементах исследуемых электрических цепей измеряются осциллографом. Курсорами в режиме «НАПРЯЖЕНИЕ» отмечается минимальное и максимальное значения сигнала, искомая величина определяется как:

$$U_m = \Delta U/2. \tag{6.16}$$

Измерение тока в первичной и вторичной обмотках трансформатора осуществляется с помощью *двух* мультиметров VC 9808⁺, полученных у преподавателя. Для измерения токов необходимо перевести ручки на мультиметрах в соответствующие положения, а щупы установить в соответствующие гнезда. При измерении напряжения мультиметры должны находиться в режиме измерения переменного тока (AC).

Выставление номинала сопротивления нагрузки осуществляется при отключенном резисторе из схемы и контролируется с помощью мультиметра, переведенного в положение измерения сопротивления.

Для снятия АЧХ необходимо подключить Канал 1 осциллографа к выходу вторичной обмотки трансформатора (нагрузке). С помощью органов управления поместить исследуемый сигнал в центральную часть экрана. Регулировкой чувствительности по напряжению добиться, чтобы размах сигнала составлял порядка 2/3 экрана. Регулировкой длительности развертки добиться отображения на экране 2÷3 периодов сигнала. При изменении частоты измеряемого сигнала корректировать с помощью чувствительности по напряжению и длительности развертки указанные выше пропорции сигнала на экране.

Перед выполнением работы составить отчет, который должен содержать краткие элементы теории, *все исследуемые схемы, таблицы и расчеты, указанные в программе работы.* Схемы и таблицы должны быть выполнены карандашом и в соответствии с требованиями ЕСКД.

Студент, не подготовивший отчет, к выполнению лабораторной работы не допускается.

3. Программа работы

Выставить на генераторе синусоидальное напряжение с амплитудой U_m =5 В (напряжение смещения – 0 В, асимметрия – 50 %) и частотой f=1000 Гц. Установить максимальную величину сопротивления R.

1. Исследовать влияние числа витков вторичной обмотки на коэффициент трансформации.

1.1. На лабораторном макете собрать схему для исследования коэффициента трансформации нижней обмотки трансформатора (рис. 6.15, а).



Рис. 6. 15. Схемы проводимых исследований

1.1.1. Подключить первый канал осциллографа к генератору (точка 1), а второй – к резистору R (точка 2). Зарисовать временные диаграммы напряжения на сопротивлении и генераторе. Определить U_{Im} , U_{2m} и n [используя выражение (6. 6)]. Полученные результаты занести в табл. 6.1.

1.2. На лабораторном макете собрать схему для исследования коэффициента трансформации верхней обмотки трансформатора (рис. 6.15, б).

1.2.1. Зарисовать временные диаграммы напряжения на сопротивлении и генераторе. Определить U_{1m} , U_{2m} и *n*. Полученные результаты занести в табл. 6.1.

1.3. На лабораторном макете собрать схему для исследования суммарного коэффициента трансформации нижней и верхней обмоток трансформатора (рис. 6.15, в).

1.3.1. Зарисовать временные диаграммы напряжения на сопротивлении и генераторе. Определить U_{1m} , U_{2m} и *n*. Полученные результаты занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

| Параметр | Нижняя обмотка | Верхняя обмотка | Σ |
|----------|----------------|-----------------|---|
| U_{lm} | | | |
| U_{2m} | | | |
| n | | | |

2. Исследовать встречное включение обмоток трансформатора. На лабораторном макете собрать схему согласно рис. 6.15, г. Зарисовать временные диаграммы напряжения на сопротивлении и генераторе. Сравнить временные диаграммы с полученными в п. 1.3.1.

3. Исследовать влияние постоянной составляющей входного напряжения на работу трансформатора. На лабораторном макете собрать схему согласно рис. 6.15, в. Выставить на генераторе напряжение смещения – 2 В. Зарисовать

временные диаграммы напряжения на сопротивлении и генераторе. Особое внимание уделить совмещению осей нуля 1 и 2 каналов осциллографа.

4. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на ток первичной и вторичной обмоток. На лабораторном макете собрать схему согласно рис. 6.15, а. Выставить на генераторе напряжение смещения – 0 В, частоту f=200 Гц. Изменяя сопротивление нагрузки от 200 до 1000 Ом с шагом 200 Ом снять зависимость величины токов первичной и вторичной обмоток. Полученные результаты занести в табл. 6.2. Используя данные, полученные в п. 1.1.1, и схему рис. 6. 11 рассчитать значение тока первичной обмотки для каждого значения сопротивления нагрузки. Полученные результаты занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

| R | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| I _{1изм} | | | | | |
| I_{Inacy} | | | | | |

5. Определить нижнюю граничную частоту трансформатора. В схеме рис. 6.15, в отключить сопротивление нагрузки от трансформатора. Подключить первый канал осциллографа к т. 2. Изменяя частоту генератора от 10 до 100 Гц с шагом 10 Гц, снять зависимость U_{2m} от частоты. Полученные результаты занести в табл. 6.3. Построить полученную зависимость и определить ω_n . Используя выражение 6. 14, определить взаимную индукцию, учитывая, что R_2 =150 Ом.

| | | | | | | | | | | 4 |
|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| <i>f</i> ген, Гц | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| U_{2m}, B | | | | | | | | | | |

6. Определить верхнюю граничную частоту трансформатора. В схеме рис. 6.15, в установить сопротивление R=1000 Ом. Подключить первый канал осциллографа к т. 2. Изменяя частоту генератора от 100 до 1000 кГц с шагом 100 кГц, снять зависимость U_{2m} от частоты. Полученные результаты занести в табл. 6.4. Построить полученную зависимость и определить ω_{g} . Используя выражение 6. 15, определить суммарную индуктивность рассеивания трансформатора $L_s = L_{s1} + n^2 \cdot L_{s2}$.

Таблица 6.4

Таблица 63

| $f_{\rm ren}$, к Γ ц | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| U_{2m} , B | | | | | | | | | | |

7. Провести анализ полученных результатов

4. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.

2. Какие катушки индуктивности называются магнитно-связанными?

3. Как изменяется полное сопротивление цепи при последовательном согласном включении магнитно-связанных катушек индуктивности? 4. Как изменяется полное сопротивление цепи при последовательном встречном включении магнитно-связанных катушек индуктивности?

5. Какую роль в трансформаторе выполняет магнитный сердечник?

6. Как определяется коэффициент трансформации?

7. Как между собой соотносятся напряжения и токи первичной и вторичной обмоток трансформатора?

8. Каким образом пересчитываются в цепь первичной обмотки R, L и C, включенные в цепь вторичной обмотки?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теоретические основы электротехники: учеб. пособие/ В.С. Гуров, Е.В. Мамонтов, С.А. Круглов, Т.А. Глебова. Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань: РГРТУ, 2011. 140 с.

2. Иванов И.И. Электротехника: учеб. пособие. СПб.:Лань, 2008. 496 с.

3. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов. - М.:Академия, 2005. 394 с.

4. Кузовкин В.А. Теоретическая электротехника: учеб. для вузов. М.:Логос, 2006. 479 с.

5. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Том 1: учеб. для вузов. СПб.:Питер, 2003. 462 с.

6. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Том 2: учеб. для вузов. СПб.:Питер, 2003. 575 с.

7. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Том 3: учеб. для вузов. СПб.:Питер, 2003. 376 с.

8. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для вузов. М.:Издательский центр «Академия», 2005. 544 с.

9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. для вузов. М.:Гардарики, 2002. 638 с.

10. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учеб. пособие. СПб.:Лань, 2009. 592 с.

11. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле: учеб. пособие. СПб.:Лань, 2009. 432 с.

12. Шатенье Г., Боэ М., Буи Д., Вайан Ж., Веркиидер Д. Учебник по общей электротехнике. М.: Техносфера, 2009. 624 с.

13. Осциллографы цифровые АКИП-4115/1А-7А: Руководство по эксплуатации. – Москва, 2012. 64 с.

14. Генератор сигналов специальной формы GFG -3015: Руководство по эксплуатации. – Москва, 2012. 36 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



ПРИЛОЖЕНИЕ 2 МУЛЬТИМЕТР VC9808+

Мультиметр VC9808+ – цифровой мультиметр с питанием от батареи. Прибор имеет функции измерения постоянного и переменного напряжения, постоянного и переменного тока, сопротивления, емкости, индуктивности, температуры и частоты, проверки диодов, транзисторов и прозвонки цепей.



Передняя панель мультиметра VC9808+ 1. Описание лицевой панели (см. рисунок)

 жидкокристаллический дисплей, на котором отображаются измеренное значение и единица измерения;
 функциональные кнопки:

POWER – включение/выключения питания;

В/L – включение/выключение подсветки жидкокристаллического дисплея;

HOLD – включение режима фиксации максимального показания дисплея (при включенном режиме рядом с результатом измерений появляется значок «PH»;

DC/AC – переключение между режимами измерения постоянных и переменных сигналов.

Гнездо **hFE** служит для измерения коэффициента усиления транзисторов;

3 – переключатель диапазонов: служит для выбора измерительной функции и предела измерения;

4 – входы для измерения:

VΩHz – измерение напряжения, сопротивления, частоты;

mA и **20A** – измерение силы тока;

СОМ – общий вход;

5 – входы для измерения емкости (Cx), индуктивности (Lx) и температуры ТЕМР.

2. Работа с мультиметром

1. Проверьте работоспособность батареи питания включением кнопки POWER. Если батарея разряжена, то на дисплее появится знак «——)». В этом случае замените батарею. При отсутствии знака можно выполнять измерения.

2. Значок ⚠, расположенный на приборе рядом с гнездами (4), служит для предупреждения, что нельзя превышать допустимые пределы величин входных сигналов, в противном случае произойдет повреждение прибора. Значок ⚠ говорит о возможном присутствии опасного напряжения.

3. Перед измерениями переключатель функций (3) необходимо установить на требуемую функцию измерения.

2.1. Измерение постоянного и переменного напряжения

1. Установите черный щуп в разъем COM (4), а красный щуп в гнездо VΩHz (4).

2. Поставьте переключатель диапазонов (3) на требуемый предел измерения напряжения и подсоедините щупы параллельно измеряемой схеме.

Замечание:

1. Если величина измеряемого напряжения заранее неизвестна, установите переключатель диапазонов (3) на максимальное значение и переключая диапазоны добейтесь требуемой точности измерений.

2. Для выбора постоянного или переменного напряжения установите переключатель **DC/AC** в требуемое положение.

3. Если на дисплее появляется символ «**0L**» или «**1**», значит величина входного сигнала слишком велика для данного диапазона измерения, переключитесь на больший диапазон измерения.

4. Не подавайте на вход напряжения свыше 1000 В для постоянного и 700 В для переменного напряжения. Индикация возможна и при больших напряжениях, но при этом есть опасность повреждения схемы прибора.

5. При измерении высоких напряжений следите за тем, чтобы случайно не задеть токопроводящие цепи.

2.2. Измерение постоянного и переменного тока

1. Установите черный щуп в разъем COM (4), а красный щуп в гнездо **mA** или **20A** (4).

2. Для выбора режима измерения постоянного или переменного тока установите переключатель **DC/AC** в требуемое положение.

3. Поставьте переключатель диапазонов (3) на требуемый предел измерения тока. Подсоедините щупы последовательно измеряемой схеме.

4. Для измерения тока в диапазоне от 200мА до 20А установите красный щуп в гнездо **20А** (4).

Замечание:

1. Если величина измеряемого тока заранее неизвестна, установите переключатель диапазонов на максимальное значение и переключая диапазоны, добейтесь требуемой точности измерений.

2. Если на дисплее появляется символ «0L», значит величина входного сигнала слишком велика для данного диапазона измерения, переключитесь на больший диапазон измерения.

3. Максимальный входной ток составляет 200мА или 20А, в зависимости от используемого гнезда. Слишком большой ток сожжет предохранитель, который потребует замены. Вход "20А" не защищен предохранителем.

4. Максимальное падение напряжения при измерении тока составляет 200мВ.

2.3. Измерение сопротивления

1. Установите черный щуп в разъем СОМ (4), а красный щуп в гнездо VΩHz (4). 2. Поставьте переключатель диапазонов (3) на требуемый предел измерения. Если величина измеряемого сопротивления заранее неизвестна, установите переключатель диапазонов на максимальное значение и переключая диапазоны, добейтесь требуемой точности измерений.

3. Подсоедините щупы прибора параллельно измеряемой схеме. Убедитесь, что схема не находится под напряжением. Максимально допустимое входное напряжение 250В в течение не более 10 с.

Замечание:

1. Если величина измеряемого сопротивления превышает выбранный предел измерения, на дисплее появляется символ перегрузки «**0L**». Установите переключатель пределов на большее значение: для сопротивлений величиной свыше 1 МОм установление показаний может занять несколько секунд. Это нормальное явление при измерении больших сопротивлений.

2. Если к входу ничего не подключено, т.е. цепь разомкнута, на дисплее горит «**0L**».

3. При проверки сопротивлений в схемах убедитесь, что схема обесточена и все конденсаторы разряжены.

4. Не подавайте напряжений при измерении сопротивлений.

5. Напряжение разомкнутой цепи при измерении сопротивления составляет 3В.

2.4. Измерение емкости конденсаторов

1. До установки в гнезда конденсатора обратите внимание, что дисплей может показывать значения, отличные от нуля, при смене диапазона измерения. Это смещение не влияет на точность измерений, так как оно подавляется сигналом при нормальном измерении.

2. Установите исследуемый конденсатор в гнезда (5), соблюдая при необходимости полярность подключения.

Замечание:

1. Если величина измеряемой емкости превышает выбранный предел измерения, на дисплее появляется символ перегрузки «**0L**». Установите переключатель пределов (3) на большее значение.

2. Перед установкой конденсатора в разъем Сх (5) показания на дисплее могут быть отличны от нуля, остаточное значение постепенно стремится к нулю и его можно не учитывать, поскольку оно подавляется сигналом при нормальном измерении и не влияет на точность показаний.

3. 1 nF (нанофарад) = $10^{-3} \mu F$ (микрофарад) = 1000 pF (пикофарад).

4. Не подавайте на входные гнезда никакого напряжения и не измеряйте емкость заряженных конденсаторов (особенно больших номиналов). Перед измерением все конденсаторы необходимо разряжать.

2.5. Измерение индуктивности катушек

1. Установите переключатель на требуемый предел измерения индуктивности (3).

2. Вставьте катушку индуктивности в соответствующие гнезда (5) на передней панели прибора.

Замечание:

1. Если величина индуктивности заранее неизвестна, установите переключатель диапазонов в положение 2mH и затем постепенно переключайте диапазоны до тех пор, пока не исчезнет индикация перегрузки и дисплей не покажет результаты измерений с максимальной разрешающей способностью.

2. Измерение малых значений индуктивности необходимо проводить при очень коротких соединительных выводах, иначе в показания могут быть привнесены значения индуктивности выводов.

3. Прибор не предназначен для измерения добротности катушек. При измерении индуктивности катушек, имеющих активное сопротивление, могут получиться большие ошибки.

2.6. Диодный тест и прозвонка соединений

1. Установите черный щуп в разъем **COM** (4), а красный щуп в гнездо **VΩHz** (4). (Замечание: полярность красного щупа при этом положительна).

3. Подсоедините щупы к исследуемому диоду, дисплей покажет приблизительное прямое падение напряжения на диоде.

4. Подсоедините щупы к двум точкам проверяемой схемы. Если сопротивление между точками менее 90 Ом, прозвучит сигнал зуммера.

Замечание:

1. Если щупы прибора не подключены, т.е. схема разомкнута, на дисплее появится символ «0L».

2. Ток, протекающий через диод во время теста, составляет 1мА.

3. Прибор показывает прямое падение напряжения в милливольтах, при обратном включении диода показывает перегрузку.

2.7. Транзисторный тест

1. Установите переключатель функций (3) в положение hFE.

2. Определите тип проводимости транзистора NPN или PNP и определите местоположение эмиттера, базы и коллектора, установите выводы транзистора в соответствующие гнезда на передней панели.

3. Дисплей покажет приблизительное значение коэффициента hFE при токе базы 10 мкА и напряжении коллектор-эмиттер 2,8 В.

2.8. Измерение температуры

1. Установите переключатель функций (3) в положение °С.

2. Вставьте выводы термопары в гнездо (5), соблюдая полярность, и поместите термопару в исследуемую среду. Дисплей покажет температуру измеряемого объекта.

Замечание:

1. Если на вход ничего не подключено, прибор показывает температуру окружающей среды.

2. Произвольная смена термопары может повлиять на точность измерений.

3. При измерении температуры не подавайте на вход никаких напряжений.

2.9. Измерение частоты

1. Вставьте щупы или экранированный кабель в гнезда VΩHz и COM (4).

2. Установите переключатель функций (3) в положение 10МНz и подсоедините щупы к источнику сигнала.

Замечание:

1. Не подавайте на вход напряжения свыше 250 В, индикация возможна и при напряжении свыше 10 В, но при этом не будет соответствовать спецификации.

2. Для измерения слабых сигналов в условиях больших наводок рекомендуется использовать экранированный кабель.

3. При работе со схемой, имеющей высокое напряжение, соблюдайте предельную осторожность.

4. Измерение частоты производится только в режиме автоматического выбора диапазона измерения.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 ОСЦИЛЛОГРАФ АКИП-4115/3А

1. Назначение кнопок передней панели и иконок на экране

На рис. П 3. 1 представлена передняя панель осциллографа АКИП-4115/3А.



Рис. П 3. 1. Передняя панель осциллографа АКИП-4115/3А Поясним основное предназначение кнопок, регуляторов и разъемов на передней панели осциллографа, представленных на рис. П 3. 1: 1 – жидкокристаллический экран;

2 – кнопки управления ЭКРАННЫМ МЕНЮ;

3 – многофункциональный регулятор с кнопкой УСТАНОВКА;

4...9 – кнопки-индикаторы МЕНЮ:

4 – КУРСОРЫ (кнопка-индикатор включения меню управления курсорами);

5 – СБОР ИНФ (кнопка-индикатор включения меню управления сбором информации);

6-ЗАП/ВЫЗ (кнопка-индикатор включения меню управления записью/воспроизведением профилей и осциллограмм);

7 – ИЗМЕР (кнопка-индикатор включения и выключения меню измерений);

8 – ДИСПЛ (кнопка-индикатор включения и выключения меню управления режимами экрана);

9 – УТИЛИТЫ (кнопка-индикатор включения меню утилит);

10 – НАЧ УСТ (кнопка вызова начальных установок);

11 – ПОМОЩЬ (кнопка вызова подсказки управления осциллографом); 12...13 – управление запуском:

12 – ОДНОКР (кнопка-индикатор однократного запуска);

13 – ПУСК/СТОП (кнопка-индикатор запуска или остановки сбора информации);

14...18 – управление каналом вертикального отклонения:

14 – СМЕЩЕНИЕ (вращение кнопки-регулятора производит смещение линии развертки выбранного канала в вертикальном направлении, нажатие на регулятор производит установку смещения в нулевое значение - линия развертки устанавливается в центр экрана);

15 – КАН 1 КАН 2 (кнопка-индикатор включения/выключения выбранного канала, одновременно происходит переключение экранного меню на выбранный канал);

16 – МАТЕМ (кнопка-индикатор управления меню математики);

17 – ОПОРН (кнопка-индикатор включения/выключения меню управления записью опорных осциллограмм);

18 – мВ-В (кнопка-регулятор установки коэффициента отклонения выбранного канала);

19...21 – управление каналом горизонтального отклонения:

19 – СМЕЩЕНИЕ (вращение кнопки-регулятора приводит к смещению линии развертки в горизонтальном направлении, для установки нулевого значения задержки нажать на регулятор);

20 – ГОРИЗ МЕНЮ (кнопка-индикатор включения или выключения горизонтального меню);

21 – ВРЕМЯ/ДЕЛЕНИЕ (вращение кнопки-регулятора изменяет значение коэффициента развертки, нажатие на кнопку-регулятор приводит к переключению в режим выделения окна для растяжки);

Растяжка осуществляется в экранном меню если значение коэффициента развертки было изменено после остановки сбора информации, для возвращения к исходному значению нажать на регулятор-кнопку «ВРЕМЯ/ДЕЛЕНИЕ»;

22...26 – управление запуском развертки:

22 – ABTO (кнопка автоматического поиска сигнала и установки оптимального размера изображения на экране);

23 – МЕНЮ СИНХР (кнопка-индикатор включения или выключения меню управления режимами синхронизации);

24 – УСТ НА 50 % (кнопка установки уровня запуска на 50 % от уровня сигнала);

25 – ФОРС (кнопка, при нажатии которой происходит перезапуск сбора информации, сброс усреднений, результатов измерений и пр.);

26-УРОВЕНЬ (вращение кнопки-регулятора производит изменение уровня запуска, нажатие на регулятор производит автоматическую установку уровня синхронизации равным 0 мВ);

27...31 – разъемы передней панели:

27 – КАЛИБРАТОР (выход калибратора 1 кГц 3 В для компенсации делителей);

28 – ВНЕШ СИНХР (гнездо входа внешней синхронизации);

29 – КАН 1 КАН 2 (входные гнезда Канала 1 и Канала 2);

30 – USB (разъем подключения внешнего USB носителя);

31 – ПЕЧАТЬ (в зависимости от выбранного режима это кнопка сохранения осциллограмм в графическом виде или запуска печати на принтер).

Кнопки управления ЭКРАННЫМ МЕНЮ (2)

- «НАЖМИТЕ КНОПКУ МЕНЮ» означает нажатие кнопки справа от соответствующего меню, отображаемого на экране осциллографа. При наличии всплывающих меню нажатие на соответствующие кнопки осуществляет выбор значений из всплывающего меню. Альтернативой выбора пунктов меню кнопками является выбор многофункциональным регулятором с кнопкой УСТАНОВКА (3).

- МЕНЮ ВКЛ/ВЫКЛ включает или выключает отображение меню на экране осциллографа.

Многофункциональный регулятор с кнопкой УСТАНОВКА (3)

- При отсутствии всплывающих меню вращение регулятора осуществляет регулировку яркости линии развертки. Яркость луча отображается на ЖКИ в процентах от максимального значения.

- При наличии всплывающих меню вращение регулятора осуществляет выбор значений из всплывающего меню, нажатие на кнопку осуществляет выбор заданного значения. Если при наличии всплывающего меню выбрать соответствующий пункт, но не нажать регулятор, то через 5...10 секунд произойдет автовыбор параметра. Альтернативой выбора пунктов меню регулятором УСТАНОВКА (3) является выбор последовательным нажатием на соответствующие кнопки экранного меню (2).

Кнопки-индикаторы МЕНЮ (4...9)

Нажатие на кнопку выводит на экран соответствующее меню, повторное нажатие на кнопку убирает данное меню с экрана осциллографа.
Управление запуском - кнопка-индикатор однократного запуска ОДНОКР (12)

Однократное нажатие на кнопку производит остановку процесса сбора информации. Повторное нажатие на кнопку переводит схему синхронизации в режим готовности к однократному запуску. Запуск развёртки будет осуществляться однократно только при наличии запускающего (входного) сигнала.

Управление каналом вертикального отклонения - регулятор-кнопка установки коэффициента отклонения выбранного канала мВ-В (18)

Вращение регулятора изменяет значение коэффициента отклонения «грубо». При нажатии на регулятор осциллограф переключается в режим изменения значения коэффициента отклонения «плавно». Значение выбранного режима «грубо» или «плавно» отображается только в экранном меню. Для возврата в режим «грубо» нажать на регулятор еще раз.

Управление каналом горизонтального отклонения – кнопка-регулятор установки коэффициента развертки ВРЕМЯ/ДЕЛЕНИЕ (21)

Нажатие на кнопку-регулятор приводит к переключению в режим выделения окна для растяжки. Растяжка осуществляется в экранном меню. Если значение коэффициента развертки было изменено после остановки сбора информации, для возвращения к исходному значению нажать на регуляторкнопку «ВРЕМЯ/ДЕЛЕНИЕ».

Рассмотрим основные символы индикации на жидкокристаллическом экране (1) осциллографа АКИП-4115/3А. Типичное окно осциллографа АКИП-4115/3А представлено на рис. П 3. 2.

Поясним основное предназначение иконок в окне осциллографа, представленных на рис. П 3. 2:

1 – индикатор отображения состояния схемы синхронизации:



Рис. П 3. 2. Типичное окно осциллографа АКИП-4115/3А

Trig – осциллограф находится в режиме синхронизации;

Stop – сбор информации остановлен;

Scan – развертка осциллографа находится в режиме самописца.

2 – индикатор соотношения отображения на экране видимой части осциллограммы и полной длины памяти сбора информации:

(marine and a second and

 – отображаемая на экране часть памяти меньше, чем полная длина памяти осциллографа (часть информации находится слева и справа от экрана).

— отображаемая на экране часть памяти больше, чем полная длина памяти осциллографа.

T – символ обзорной индикации расположения точки запуска развертки по отношению к полной длине памяти.

4 – индикатор отображения режима печати экранного изображения при нажатии кнопки «ПЕЧАТЬ» (31):

Р – режим печати экрана на принтер;

S – режим сохранения экрана как ВМР-файла.

5 – индикатор отображения режима работы USB разъема, расположенного на задней панели осциллографа:

🗑 – режим работы разъема задан как передача данных на ПК;

🕲 – режим работы разъема задан как печать на USB принтер.

6 – индикатор точки «земли»:

1→ – индикатор точки «земли» Канала 1;

2→ – индикатор точки «земли» Канала 2.

7 – индикатор уровня синхронизации.

Т→ – при синхронизации от Канала 1 имеет желтый цвет, при синхронизации от Канала 2 имеет синий цвет.

8 – результаты измерений после нажатия на кнопку «АВТО» (при выборе синхронизации от Канала 1 результаты измерений имеют желтый цвет, при выборе синхронизации от Канала 2 результаты измерений имеют синий цвет).

9 – значок показывает настройки вертикального отклонения: в левом углу показан номер канала (CH1 – канал 1, CH2 – канал 2), далее вид связи (Ш – по переменному току, Ш – по постоянному току, Ц – вход отключен от входного сигнала и заземлен), значение коэффициента отклонения (в вольтах, например, «1.00V»), включение ограничения ширины полосы пропускания (присутствие символа «В» означает включение ограничения ширины полосы пропускания 20 МГц), например, «

10 – значение коэффициента развертки основной развертки (начинается с символа «М», далее значение коэффициента, например, «М 50.0µs») или растяжки (начинается с символа «W», далее значение коэффициента, например, «W 2.50µs»).

11 – значение времени задержки основной развертки («М Pos:0.00µs») или растяжки («W Pos:5.30µs»).

12 – индикатор источника синхронизации (СН1 или СН2), вида синхронизации и уровня синхронизации, например, «СН1/1520».

13 – вид синхронизации:

и - по нарастающему фронту;

- по спадающему фронту;

🖾 - по любому фронту;

🔟 - по параметрам положительного импульса;

- по параметрам отрицательного импульса;

в Эленизация;

и - по скорости нарастания;

2 - по скорости спада.

14 – 🖾 индикатор подключения USB устройства к разъему «USB» (30).

На экране кратковременно могут появляться и исчезать следующие вспомогательные символы и надписи:

VoltsPos=2.14V – значение напряжения постоянного смещения канала вертикального отклонения;

TRIGLVL=1.72V – значение уровня синхронизации;

f=5.00008KHz – значение частоты сигнала в канале, использующемся как канал синхронизации.

2. Управление каналом вертикального отклонения

Вертикальная регулировка является одноканальной, то есть каждый из каналов имеет независимые органы управления. Для включения канала нажмите его кнопку КАН 1 или КАН 2 (15). Для выключения канала нажмите эту кнопку еще раз.

Если канал активен, то подсвечивается кнопка соответствующего канала и на экране отображается коэффициент отклонения включенного канала. Канал 1 отображается желтым цветом, Канал 2 отображается синим цветом.

Если ни одна из канальных кнопок не горит, это означает, что либо ни один из каналов не включен, либо активирована одна из осциллограмм - математики, растяжки или памяти. В этом случае ручки вертикального смещения и усиления мВ-В (18) регулируют положение и масштаб по вертикали соответствующих осциллограмм математики, растяжки или памяти (опорный сигнал).

При включенном режиме математики подсвечивается кнопка МАТЕМ (16) и появляется осциллограмма зеленого цвета. Для отключения математической функции нажать на кнопку МАТЕМ (16) еще раз, кнопка гаснет, и осциллограмма математики исчезает.

При включенном режиме опорных осциллограмм подсвечивается кнопка ОПОРН (17) и появляются осциллограммы красного и фиолетового цветов. Для отключения опорных осциллограмм нажать на кнопку ОПОРН (17) еще раз, кнопка гаснет и осциллограммы исчезают.

Регулятор СМЕЩЕНИЕ (14) позволяет перемещать осциллограмму сигнала по вертикали, и это перемещение калибровано. При повороте регулятора значение напряжения в течение короткого времени отображается на экране, указывая, как далеко уровень земли сигнала находится от центра экрана. Маркер уровня «земли» на левой стороне экрана перемещается в соответствии с действием регулятора. Для возврата к нулевому смещению линии развертки нажать на ручку регулятора, при этом положение осциллограммы мгновенно вернется к нулю. Этот режим ускоренного переключения особенно полезен, когда положение осциллограммы находится далеко за экраном, и необходимо немедленно вернуть его к центру экрана.

Изменение коэффициента отклонения (вертикальной чувствительности) осуществляется с помощью регулятора мВ-В (18), текущее значение коэффициента отклонения отображается в строке состояния на экране осциллографа.

Для изменения коэффициента отклонения необходимо:

– нажать кнопку КАН 1 или КАН 2 (15) (при этом на экране появится меню функциональных кнопок) и Канал 1 (Канал 2) будет включен (или останется включенным, если это было сделано ранее);

-нажать на функциональную кнопку экранного меню «В/Дел», выбрать шаг изменения вертикального масштаба «Грубо» или «Точно» (переключать режимы Грубо/Точно, можно не только используя меню каналов 1 и 2, но также просто нажав на регулятор мВ-В) и вращать регулятор мВ-В (18) для установки необходимого масштаба изображения сигнала.

Экранное меню канала вертикального отклонения показано на рис. П 3. 3 (на примере для канала 1), а пояснения в табл. П 3.1.



Рис. П 3. 3. Экранное меню канала 1 вертикального отклонения

Таблица П 3.1

| D | | | |
|---------------|--------|---------------|------------|
| экранное меню | канала | вертикального | отклонения |
| | | | |

| Меню | Установки | Комментарии | |
|-------------|-----------|--|--|
| Связь входа | AC | Блокирует составляющую постоянного тока во | |
| | | входном сигнале | |
| | DC | Пропускаются обе составляющие постоянного и | |
| | | переменного тока входного сигнала | |
| | «Земля» | Отключает входной сигнал от входа осциллографа | |
| | | и замыкает вход осциллографа на корпус прибора | |

Окончание табл. П 3.1

| ОгрПП | Вкл | Ограничивает ширину полосы пропускания канала |
|----------|----------|--|
| | | до 20МНг для уменьшения шумов экрана |
|] | Выкл | Полная полоса пропускания |
| В/дел | Грубо | Коэффициент развертки изменяется в пределах от |
| | | 2 мВ до 5 В с шагом 1-2-5 |
| , | Точно | Коэффициент развертки изменяется плавно |
| Делитель | 1X/10X | Выбор коэффициента деления внешнего пробника |
| | | необходим для корректного результата автомати- |
| | | ческих или курсорных измерений |
| След Стр | Page 1/2 | Переход на следующую страницу меню |
| Инверсия | Вкл/Выкл | Включение или выключение инверсии входного |
| | | сигнала (при сохранении формы сигнала сигнал |
| | | сохраняется без инверсии) |
| Фильтр | Вкл/Выкл | Использование цифровых фильтров для выбранно- |
| | | го канала |
| | | После включения цифрового фильтра |
| | | можно выбрать его тип: |
| Тип | Ê⊐f | Фильтр низкой частоты ФНЧ |
| | 1f | Фильтр верхней частоты ФВЧ |
| | tf | Полосной фильтр ПФ |
| | tf | Режекторный фильтр РФ |
| ВерСрез | | Вращением регулятора УСТАНОВКА (3) устано- |
| | | вить верхнюю граничную частоту |
| НижСрез | | Вращением регулятора УСТАНОВКА (3) устано- |
| | | вить нижнюю граничную частоту |
| Назад | | Возвращение к предыдущему |
| След Стр | Page 2/2 | Переход на предыдущую страницу меню |

3. Математические функции и быстрое преобразование Фурье

Математические функции включают сложение, вычитание, умножение, деление и быстрое преобразование Фурье (БПФ) для сигналов каналов 1 и 2. Результат математических действий может также быть измерен с помощью делений сетки и курсора, автоматические измерения для математических функций не возможны. В табл. П 3.2 представлено экранное меню математических функций и БПФ (меню математики), которое появляется при нажатии на кнопку МАТЕМ (16)

Таблица П 3.2

| Экранное меню математики | | |
|----------------------------|-----------|-----------------------------|
| Меню Установки Комментарии | | |
| Операция | Кан1+Кан2 | Сложить Канал 1 и Канал 2 |
| | Кан1–Кан2 | Вычесть Канал 2 из Канала 1 |
| | Кан2-Кан1 | Вычесть Канал 1 из Канала 2 |

Окончание табл. П 3.2

| | Кан1*Кан2 | Умножить Канал 1 на Канал 2 |
|-----------|-----------|---|
| | Кан1/Кан2 | Разделить Канал 1 на Канал 2 |
| | Кан2/Кан1 | Разделить Канал 2 на Канал 1 |
| | БПФ (FFT) | БПФ в выбранном канале |
| Инверсия | Вкл | Инверсия осциллограммы результата матема- |
| | | тической операции |
| | Выкл | Отображение исходной осциллограммы резуль- |
| | | тата математической операции |
| t) . Bent | | Вращением регулятора УСТАНОВКА (3) уста- |
| · · · · | | новить вертикальное смещение канала матема- |
| | | тики |
| t) this | | Вращением регулятора УСТАНОВКА (3) уста- |
| NORVINA | | новить коэффициент отклонения канала мате- |
| | | матики |

БПФ – преобразование формы сигнала реального времени в спектр сигнала, режим БПФ позволяет найти частотные компоненты (спектр) сигнала во временной области. Режим БПФ в лабораторном практикуме используется для анализа гармонических составляющих сигналов.

Для использования режима БПФ необходимо выполнить следующие действия:

- установить источник сигнала (во временной области);

-отобразить спектр БПФ;

-выбрать тип окна БПФ;

 – настроить частоту выборки для отображения основной частоты и гармоник без искажений;

-использовать элементы управления масштабом для увеличения спектра;

-провести измерения спектра с помощью курсоров.

Управление режимом БПФ осуществляется с экранного меню (табл. П 3.3)

Таблица П 3.3

| Меню | Установки | Комментарии |
|----------|---|--|
| Операция | БПФ (FFT) | Выбор режима БПФ |
| Источник | CH1 | Выбор канала 1 в качестве источника БПФ |
| | CH2 | Выбор канала 2 в качестве источника БПФ |
| Окно | Выбор окна для | а БПФ. |
| | Функция математических операций включает четыре параметра окна БПФ. | |
| | Типы окна определяют компромисс между разрешением по частоте и точ- | |
| | ностью амплитуд | ных измерений. Выбор окна определяется необходимо- |
| | стью измерения н | сонкретных величин и характеристиками исходного сиг- |
| | нала | |

Экранное меню БПФ

Окончание табл. П 3.3

| | Rectangle | Прямоугольное окно подходит для большинства | |
|----------|--------------|--|--|
| | | сигналов, не имеющих разрывов | |
| | Blackman | Окно Блэкмена обеспечивает худшую погреш- | |
| | | ность измерения по частоте, чем окно Хеннинга, | |
| | | но обеспечивает лучшее исследование сигналов | |
| | | с малой амплитудой | |
| | Hanning | Окно Хеннинга обеспечивает большую точ- | |
| | | ность измерения по частоте, но меньшую точ- | |
| | | ность измерения по амплитуде по сравнению с | |
| | | плоским окном | |
| | Hamming | Окно Хэмминга обеспечивает немного лучшее | |
| | | разрешение по частоте, чем окно Хеннинга | |
| Растяжка | 1X/2X/5X/10X | Выбор значения масштабирования спектра в со- | |
| БПΦ | | ответствующее число раз. Перемещение значе- | |
| | | ния центральной частоты осуществляется регу- | |
| | | лятором временной задержки | |
| След Стр | Page 1/2 | Переход на следующую страницу меню | |
| Шкала | | Выбор линейной или логарифмической шкалы | |
| Дисплей | | Выбор вида представления экрана - разделен- | |
| | | ный на осциллограмму и спектр или совмещен- | |
| | | ный на одном экране | |
| След Стр | Page 2/2 | Переход на предыдущую страницу меню | |

4. Управление каналом горизонтального отклонения

Осциллограф отображает сигналы, используя сетку с масштабом время на деление по горизонтальной оси. Поскольку все активные осциллограммы используют одну и ту же временную развертку, то прибор отображает только одно значение для всех активных каналов, кроме случаев, когда используется увеличение фрагмента (Расширение) или чередующийся запуск (Попеременно).

Горизонтальные элементы управления могут изменять горизонтальные масштаб и положение осциллограмм. Горизонтальней центр экрана - временная точка начала отсчета для осциллограмм. Изменение горизонтального масштаба приводит к растягиванию или сжатию осциллограммы относительно центра экрана. Регулятор горизонтального положения изменяет положение осциллограмм относительно момента запуска.

Горизонтальные регуляторы

ВРЕМЯ/ДЕЛЕНИЕ (21) – установка требуемого коэффициента развертки. Осциллограф АКИП-4115/3А автоматически определяет частоту дискретизации исходя из установленного значения коэффициента развертки.

Первое нажатие на регулятор включает режим выделения зоны растяжки. Зона растяжки выделена двумя вертикальными курсорами. Перемещение курсоров по горизонтали осуществляется регулятором СМЕЩЕНИЕ (19). Изменение размера окна растяжки осуществляется вращением регулятора ВРЕМЯ/ДЕЛЕНИЕ (21).

Второе нажатие на регулятор осуществляет растяжку всех осциллограмм. Изменение коэффициента масштабирования осуществляется вращением регулятора ВРЕМЯ/ДЕЛЕНИЕ (21). Перемещение осциллограмм по горизонтали осуществляется регулятором СМЕЩЕНИЕ (19). Примечание: уменьшить размер изображения меньше исходного невозможно.

Третье нажатие на регулятор отключает режим растяжки.

СМЕЩЕНИЕ (19) – изменяет горизонтальное положение осциллограмм всех каналов (включая МАТЕМ). Чувствительность этого регулятора меняется вместе с изменением длительности развертки. Нажатие на ручку этого регулятора сбрасывает смещение момента запуска (trigger offset) и возвращает его к горизонтальному центру экрана.

ГОРИЗ МЕНЮ (20) – переход к экранному меню канала горизонтального отклонения. Описание меню горизонтального отклонения представлено в табл. П 3.4.

Таблица П 3.4

| Меню | Установки | Комментарии | |
|--------------|-------------|--|--|
| Растяжка | Вкл/Выкл | Включение данной опции приводит к разделе- | |
| | | нию экрана на две части: в верхней части ото- | |
| | | бражается основной сигнал; в нижней – увели- | |
| | | ченный отрезок сигнала. Изменение размера ок- | |
| | | на растяжки осуществляется вращением регуля- | |
| | | тора ВРЕМЯ/ДЕЛЕНИЕ (21). При этом в верх- | |
| | | нем окне происходит расширение/сужение гори- | |
| | | зонтальных границ, выделенных синим цветом | |
| Выбор памяти | Выбор глуби | ины (длины) памяти | |
| - | Короткая | Одноканальный режим – 40000 точек (доступен | |
| | - | только при частоте дискретизации свыше 500 МГц). | |
| | | При частоте дискретизации ниже 500 МГц – 20000 то- | |
| | | чек | |
| | | <u>Двуканальный режим – 20000 точек</u> | |
| | Длинная | Доступна только при частоте дискретизации 500 МГц | |
| | | и ниже, при большей частоте включается «короткая | |
| | | память» (20000 точек) | |
| | | <u>Одноканальный режим – 2М точек</u> | |
| | | <u>Двуканальный режим – 1М точек</u> | |

Экранное меню горизонтального отклонения

5. Управление запуском развертки (синхронизацией)

Автоматическая установка параметров развертки, запуска и коэффициентов отклонения для отображения широкого диапазона повторяющихся сигналов возможна при нажатии на кнопку автоматического поиска сигнала и установки оптимального размера изображения на экране АВТО (22). В режиме автоматической установки при наличии сигналов на обоих входах синхронизация будет выбрана от канала, имеющего наибольший уровень сигнала. После окончания автоматической установки экранное меню приобретет вид, показанный на рис. П 3. 4.



Рис. П 3. 4. Отображение результатов быстрых измерений при автоматической установке

При использовании меню автоматической установки возможно выбрать один из четырех способов оптимизации (табл. П 3.5). В зависимости от выбранного способа оптимизации, на экране осциллографа будут отображаться быстрые измерения, наиболее характерные для этого типа автоматической установки.

Таблица П 3.5

| Способ оптимизации | Измеряемые параметры |
|---|------------------------------|
| Периодический сигнал с отображением не- | Vpp – пиковое значение |
| скольких периодов сигнала | Mean – среднее значение |
| | Prd – период сигнала |
| | Freq – частота сигнала |
| Периодический сигнал с отображением од- | Vmin – минимальное значение |
| ного периода сигнала | Vmax – максимальное значение |
| | Mean – среднее значение |
| | +Wid – длительность импульса |
| Отображение нарастающего фронта сигнала | Rise – время нарастания |
| | Vpp – пиковое значение |
| Отображение спадающего фронта сигнала | Fall – время спада |
| | Vpp – пиковое значение |

Экранное меню автоматической установки

Для отмены произведенных установок и возвращения в предыдущее состояние нажмите на кнопку справа от иконки .

Нажмите кнопку МЕНЮ СИНХР зоны СИНХР. На экране появится меню функциональных кнопок, показывая возможные установки системы запуска.

| Меню | Установки | Комментарий | |
|----------|---|---|--|
| Тип | Выбор вида синх | ронизации | |
| | Фронт | Синхронизация по фронту, запуск схемы | |
| | | синхронизации происходит в момент пере- | |
| | | сечения сигналом заданного уровня запуска | |
| | Импульс | Синхронизация по условиям длительности | |
| | | импульса, запуск схемы синхронизации | |
| | | происходит в момент, когда длительность | |
| | | импульса соответствует заданным специфи- | |
| | | ческим условиям | |
| | Видео | Синхронизация телевизионным сигналом. | |
| | | Запуск развертки для ТВ сигнала происхо- | |
| | | дит при удовлетворении специальным усло- | |
| | | виям ТВ сигнала | |
| | Наклон | Запуск осциллографа происходит в соответ- | |
| | | ствии с нарастающим или спадающим | |
| | | фронтом сигнала | |
| | Чередующийся | Поочередный запуск от Канала 1 и Канала 2 | |
| | | для несинхронизированных сигналов | |
| Источник | CH1/CH2 | Выбор источника синхронизации | |
| Режим | Выбор режима запуска развертки | | |
| | Авто - автоматический режим развертки позволяет осцилло- | | |
| | графу регистрировать даже те сигналы, которые не соответст- | | |
| | вуют условию запуска. При отсутствии пускового сигнала, со- | | |
| | ответствующего | гветствующего условиям запуска, осциллограф через опре- | |
| | деленный перио; | енный период (как определено настройкой длительности вертки) произведет самозапуск. мечание: при установке горизонтальной развертки медленнее с/дал астолатический разации на поссолает оснивлостафи реалиро | |
| | развертки) произ | | |
| | Примечание: при | | |
| | вать на входные сиг | ический режим не позволлет осцильтерифу решейро- гналы | |
| | Ждущий режим | переводит осциллограф в режим ожидания | |
| | выполнения усло | вий синхронизации, и осциллограф будет ре- | |
| | гистрировать фор | ому сигналов только при выполнении условий | |
| | запуска. При отс | сутствии этих условий осциллограф ждет их | |
| | появления и на э | кране сохраняется предыдущая осциллограм- | |
| | ма, если это возм | ОЖНО | |
| | Однократный - | в режиме однократного запуска после нажа- | |
| | тия кнопки ПУС | К/СТОП (13) осциллограф ждет выполнения | |
| | условий запуска. | При их выполнении осциллограф регистри- | |
| | рует одну форму | сигнала и останавливается. Повторный одно- | |
| | кратный запуск | возможен при нажатии на кнопку ОДНОКР | |
| | (12) | | |

Экранное меню синхронизации

| Установки | Переход к следующей странице меню | |
|-------------|---|--------------------------------------|
| Связь входа | Пост/Перем/ | Выбор вида связи схемы синхронизации |
| | ВЧ/НЧ фильтр | |
| Удерж | Установка времени удержания запуска развертки. Когда измеряемый сигнал имеет сложную форму с двумя или больше частотами повторения или периодами повторения, регулировка уровня запуска не может обеспечить устойчивого изображения сигнала. В этом случае устойчивую синхронизацию можно получить, используя за- держку запуска развертки регулируемой или ее альтернативное назва- | |
| СбрУдерж | Сброс времени удержания на 100 нс | |
| Назад | Возврат к предыл | ущей странице меню |
| _ | - | |

Рассмотри более подробно различные виды (типы) синхронизации.

<u>Синхронизация по фронту</u> (классическая синхронизация) – в этом режиме возможно выбрать синхронизацию положительным фронтом, отрицательным фронтом или любым фронтом, который будет обнаружен первым. Изменять величину уровня запуска можно с помощью регулятора УРОВЕНЬ (26).

<u>Режим синхронизации по длительности импульса</u> позволяет определить длительность положительного или отрицательного импульса, который будет вызывать запуск. Можно также задать диапазон длительностей, в пределах или вне которого будет происходить запуск. Для установки режима синхронизации по длительности необходимо выбрать тип синхронизации «**Импульс**», а затем в подменю «**Когда**» и «**УстДлит**» установить параметры импульса запуска. Меню установки параметров импульсов запуска показано в табл. П 3.7.

<u>Синхронизация по параметрам ТВ сигнала</u> дает возможность устойчивой синхронизации полного телевизионного сигнала, выбора полярности видео сигнала, выбора системы цветного телевидения, выбора ТВ-строки и ТВ-поля. (Более подробно [13 с. 31].)

<u>Синхронизация по наклону</u> дает возможность устойчивой синхронизации по условиям времени нарастания (спада) фронта сигнала. Уровни, от и до которых вычисляется время нарастания (спада), задаются пользователем. (Более подробно [13 с. 31-32].)

Таблица П 3.7

| Меню | Установки | Комментарий |
|----------------|-----------|---|
| Когда _∓=न_ | T T | Длительность положительного импульса меньше чем |
| | JF X PL | Длительность положительного импульса больше чем |
| | _=+_ | Длительность положительного импульса равна |
| | | Длительность отрицательного импульса меньше чем |

Экранное меню синхронизации по длительности импульса

Окончание табл. П 3.7

| | ┢╱┿ | Длительность отрицательного импульса больше чем |
|----------|----------------|--|
| | → =+ | Длительность отрицательного импульса равна |
| уст длит | Установка знач | ений осуществляется нажатием на кнопку экранного ме- |
| | | |

ню и вращением регулятора УСТАНОВКА (3)

<u>Чередующийся запуск.</u> Источниками запуска являются оба вертикальных канала. Этот режим можно использовать для исследования двух независимых сигналов на разных коэффициентах развертки для каждого канала. Возможно выбрать различные установки режимов запуска для каждого канала - запуск по фронту, длительности импульса, наклону и ТВ-синхронизацию. Информация об уровнях запуска, коэффициентах развертки, времени задержки и т.д. будет отображаться на экране осциллографа независимо для обоих каналов.

6. Измерения с помощью курсоров

Курсоры играют важную роль в измерении параметров сигналов. Их можно перемещать по всей области осциллограммы, измеряя напряжение и время. Курсоры удобны для быстрых, точных измерений с минимумом интеллектуальных затрат.

Курсоры управляются кнопкой КУРСОР (4) и многофункциональным регулятором УСТАНОВКА (3). При нажатии на кнопку КУРСОРЫ (3) включается экранное меню курсорных измерений (табл. П 3.8).

Рассмотрим различные режимы курсорных измерений.

<u>Ручной</u>. Осциллограф измеряет значения координат курсоров для амплитудных или временных параметров как разницу между координатами курсоров. При выборе в качестве канала MATEM, результаты имеют единицы измерения «div» (деление). Курсор можно двигать только при отображении экранного меню курсоров.

Для получения результатов измерения необходимо:

-отображение курсора A (курсор времени центрируется посередине экрана; курсор напряжения центрируется по уровню земли канала);

-отображение курсора В (выставляет необходимую точку на экране осциллографа);

– отображение горизонтального промежутка между курсорами A и B (Δ T): абсолютное время расположения курсоров A и B и время между курсорами; отображение (1/ Δ T), единицы измерения; Hz (Гц), kHz (кГц), MHz (МГц), GHz (ГГц);

– отображение вертикального промежутка между курсорами A и B (ΔV): абсолютное напряжение курсоров A и B и напряжение между курсорами.

Измеренные значения будут автоматически отображаться в правом верхнем углу экрана, когда меню курсора скрыто или на экране отображаются другие меню.

Таблица П 3.8

| Меню | Установки | Комментарий | | |
|----------|---|---|--|--|
| Режим | Ручной | Курсоры перемещаются пользователем | | |
| | Слежение | Курсоры перемещаются вместе с выбранной | | |
| | | формой сигнала | | |
| | Авто | Классические курсорные измерения не про- | | |
| | | водятся, а курсоры используются для авто- | | |
| | | матических измерений | | |
| Тип | Напряжение | Курсоры изображаются как горизонтальные | | |
| | | линии для измерения амплитудных парамет- | | |
| | | ров | | |
| | Время | Курсоры изображаются как вертикальные | | |
| | | линии для измерения временных параметров | | |
| Источник | СН1/СН2/МАТЕМ Выбор источника курсорных измерений | | | |
| CurA | Перемещение курсора А при помощи регулятора УСТАНОВКА | | | |
| 0 | (3) | | | |
| Cur B | Перемещение курсора В при помощи регулятора УСТАНОВКА | | | |
| e C | (3) | | | |

Экранное меню курсорных измерений

<u>Слежение</u>. В режиме слежения при перемещении курсора в горизонтальном направлении осциллограф автоматически находит точку пересечения с осциллограммой, и курсоры будут перемещаться вместе с выбранной формой сигнала.

Для осуществления курсорных измерений в режиме слежения необходимо: выбрать режим слежения (Режим—Слежение) для курсорных перемещений, затем выбрать канал источника (Источник—СН1 или CH2) измерений для курсора A и курсора B и перемещать курсоры с помощью регулятора УСТАНОВКА (3) для изменения их горизонтального положения.

Горизонтальное перемещение курсора возможно только при отображении меню режима слежения. Измеренные значения будут автоматически отображаться в правом верхнем углу экрана, когда меню курсора скрыто или на экране отображаются другие меню.

<u>Авто</u>. Режим курсорных измерений Авто используется совместно с режимом автоматических измерений. Данный режим служит для визуализации выбранного автоматического измерения с помощью курсоров.

7. Автоматические измерения

Автоматические измерения - это предварительно запрограммированные процедуры измерения, сокращающие операции по настройке курсоров в стандартных ситуациях, таких как измерения времени нарастания, спада, амплитуды пик-пик и т.д. Автоматические измерения рекомендуется использовать при автоматических вычислениях параметров сигнала осциллограмм. Имеется возможность выполнения измерений, общих для нескольких осциллограмм, с одновременным выводом до 5 измеряемых величин. Можно также вывести на экран полную таблицу измерений.

Если по какой-то причине параметр не может быть корректно вычислен, в блоке измерительной информации на экране появится предупреждающий символ ***, что позволяет сделать вывод о корректности дальнейших действий.

Автоматические измерения управляются кнопкой ИЗМЕР (7). При нажатии на кнопку экранное меню автоматических измерений (табл. П 3.9).

Таблица П 3.9

| Меню | Установки | Комментарий | | |
|------------|---------------------------------------|--|--|--|
| Напряж | Измерение амплитудных | ых параметров в одном из выбранных ис- | | |
| | точников | | | |
| | Источник | Выбор источника измерений | | |
| | Тип | Выбор типа амплитудных измерений | | |
| | | (из выпадающего меню иконок): Vпик - | | |
| | | размах сигнала (pic-to-pic), | | |
| | | Vмакс/Vмин - максимальное/ мини- | | |
| | | мальное значение сигнала, Vамп – ам- | | |
| | | плитудное значение сигнала и т.д. (бо- | | |
| | | лее подробно [13 с. 38-40]) | | |
| Время | к параметров в одном из выбранных ис- | | | |
| | точников | | | |
| | Источник→CH1/CH2 | Выбор источника измерений | | |
| | Тип | Выбор типа временных измерений (из | | |
| | | выпадающего меню иконок): Период, | | |
| | | Частота и т.д. (более подробно [13 | | |
| 2 | | <u>c. 40-41])</u> | | |
| Задерж | адержек между двумя выбранными ис- | | | |
| | точниками | De cara como como como como como como como com | | |
| | Источник→СН1/СН2 Т | Выоор источника измерении | | |
| | ТИП | выоор типа измерении (из выпадающе- | | |
| | | то меню иконок). Фаза и т.д. (оолее польбио [13 с 41 42]) | | |
| Deellerren | Ривод нодин и доблин из | | | |
| Бсензмер | Вывод полных таолиц из | Рибор источника | | |
| | | Выоор источника измерении | | |
| | папряж→вкл/выкл Вюля рид/Вила | Выбрать отображение одной, двух или | | |
| | Бремя→БКЛ/БЫКЛ Задорае Вид/Винад | всех трех таблиц измерений. Возможно | | |
| | Задерж→ВКЛ/ВЫКЛ | вывести полные таблицы измерений только | | |
| | | оля ооного источника, цвет таолицы соот- | | |
| | | на экране осциллографа | | |
| Назал | Возврат к прелыдущей с | границе меню | | |
| тазад | возврит к предыдущей с | punite mento | | |

Экранное меню автоматических измерений

8. Меню ДИСПЛ (8), ЗАП/ВЫЗ (6), УТИЛИТЫ (9)

Более подробно об управлении настройками экрана, записью/вызовом осциллограмм и профилей настроек, а также утилитами можно узнать в руководстве по эксплуатации [13].



специальной формы GFG -3015

1. Назначение кнопок передней панели и иконок на экране

На рисунке представлена передняя панель генератора сигналов специальной формы GFG -3015.

Основное предназначение кнопок, регуляторов и разъемов на передней панели генератора представлено в табл. П 4.1.

Таблица П 4.1

| № поз. на рис. | Наименование | Функциональное назначение |
|-------------------|--------------|--|
| 1 | СЕТЬ | СЕТЬ – сетевой выключатель имеет два фикси- |
| | | рованных положения - ВКЛ и ВЫКЛ. |
| | | Время перед повторным нажатием на кнопку должно |
| | | быть не менее 2 с, в противном случае возможен выход |
| | | генератора из строя |
| 2 | Цифро- | Табло отображения установленных режимов ра- |
| | индикаторный | боты и параметров выходного сигнала |
| | экран | |

| | | Продолжение табл. П 4.1 |
|---|--|---|
| 3 | Органы управле- ния режимами работы частото- мера | Вр.Счета - кнопка выбора времени счета в режи- ме внешнего частотомера. ЧАСТ.ВНТ./ВНШ. - выбор источника измеряе- мого сигнала (внутренний генератор или внеш- ний) |
| 4 | "Пакет" Органы для управления ре- жимом форми- рования пакетов | ПАКЕТ ВКЛ - кнопка включения/выключения режима формирования пакетов. ПАКЕТ ОДИН/МНОГО - кнопка изменения ре- жима формирования пакета импульсов или одно- кратного импульса. ПАКЕТ ФАЗА - кнопка активизации режима ус- тановки начальной фазы запуска пакета или оди- ночного импульса |
| 5 | "Модуляция" Органы управления режимами модулируемого генератора, мо- дуляции и ГКЧ. Кнопки, над кото- рыми указаны синие надписи, имеют двойное назначение. Для активизации дополнительного режима необходи- мо предварительно нажать кнопку "ПРЕФ" | Парам - установка полосы свипирования ГКЧ, глубины АМ и величины девиации ЧМ. ИСТОЧНИК - выбор формы выходного сигнала модулирующего генератора. АМ - установка режима амплитудной модуляции. ЧМ - установка режима амплитудной модуляции. ЧМ - установка режима амплитудной модуляции. Мод.Ген выбор режима установки частоты внутреннего модулирующего генератора или частоты свипирования ГКЧ. МОД.ВНУТР./ВНЕШ установка режима внутренней модуляции (ВНУТР) или внешней модуляции (ВНЕШН). СТАРТ - установка режима ввода начальной частоты свипирования ГКЧ. СТОП - установка режима ввода конечной частоты свипирования ГКЧ. ЛИН. ГКЧ - активизация режима линейного свипирования. ЛОГ. ГКЧ - активизация режима логарифмического свипирования. ЦИ - установка режима ввода коэффициента асимметрии выходного сигнала модулирующего генератора. ЦЧ ГКЧ - установка режима ввода центральной частоты свипирования. |

Продолжение табл. П 4.1

| 6 | "Осн. генера- | ФОРМА - кнопка выбора формы выходного сиг- |
|----|------------------|--|
| | тор" | нала: синусоидальной, треугольной или прямо- |
| | - | угольной. |
| | Органы управле- | ЧАСТОТА - кнопка активизации режима уста- |
| | ния режимами | новки частоты выходного сигнала. |
| | работы генера- | АМПЛ - кнопка активизации режима установки |
| | тора | напряжения выходного сигнала. |
| | | СМЕЩ - кнопка активизации режима установки |
| | | смещения постоянной составляющей выходного |
| | | сигнала. |
| | | АСИММ - кнопка активизации режима установ- |
| | | ки коэффициента асимметрии выходного сигнала. |
| | | МОД. ВКЛ кнопка включения и выключения |
| | | режима модуляции или ГКЧ |
| | | |
| 1 | I руппа кнопок | 1 ак же эти кнопки используются в качестве кноп- |
| | установки еди- | ки ввод при записи в память и вызове профилеи |
| | ниц измерения | органов управления |
| | выходных пара- | |
| 0 | метров | |
| 0 | Органы плавной | > |
| | установки значе- | |
| | пии вылодпыл | вращающийся регулятор - для плавного из- |
| | параметров | менения значения выбранного корректируемого |
| | | разряда. |
| | | УДЕРЖ - кнопка блокировки органов управления |
| | | изменения значений выходных параметров |
| 0 | осповной | |
| 9 | | Основной выход 50 Ом |
| 10 | СИНХР | Выход синхронизации ГКЧ |
| 11 | ттл | Выход сипкроппондни и и и |
| 12 | 1101 | Иифровое наборное поле прямого набора необхо- |
| | 19 | димых цифровых значений выбранных парамет- |
| | | ров, включая десятичную точку и знак минус. |
| | | Удален кнопка удаления левого неправильно |
| | | введенного разряда при вводе значения с число- |
| | | вой клавиатуры |
| 13 | ПЧН | Выход преобразователя частота - напряжение |
| 14 | МОД. ГЕН. | Выход модулирующего генератора |

| 15 | Органы управле- | ЗАП - запись во внутреннюю память профилей |
|----|-------------------------|--|
| | ния системными | органов управления. |
| | режимами рабо- | ВЫЗОВ - вызов из внутренней памяти профилей |
| | ты генератора. | органов управления. |
| | | RS-232 - выбор скорости передачи: 300, 600, |
| | Кнопки, над кото- | 1200, 2400, 4800, 9600 или 19200 интерфейса RS- |
| | рыми указаны синие | 232. |
| | надписи, имеют | НАЧАЛЬН - осуществление сброса генератора в |
| | овоиное назначение. | начальные, заводские установки. |
| | Для активизации | ПРЕФ - кнопка префикса предназначена для |
| | дополнительного | управления режимами работы кнопок с двойным |
| | режима необходи- | назначением – для установки режимов работы, |
| | мо предварительно | имеющих надписи над основными кнопками. На- |
| | нажать кнопку "ПРЕФ" | жатие на кнопку ПРЕФ зажигает на табло свето- |
| | $III L\Psi$ | диод ПРЕФ, после чего необходимо нажать ос- |
| | | новную кнопку. Повторное нажатие на кнопку |
| | | ПРЕФ без нажатия основной кнопки сбрасывает |
| | | префиксный режим |
| 16 | внеш.мод./С | Вход внешней модуляции или внешнего запуска |
| | ИНХР | при формировании пакета |
| 17 | ПНЧ | Вход преобразователя частота-напряжение |

2. Проведение измерений

2.1. Установка начальных параметров

Нажатием на кнопку «СЕТЬ» включите питание на генераторе. При первом включении генератора осуществите установку параметров генератора по умолчанию. Для этого последовательно нажмите кнопки ПРЕФ и RS-232.

2.2. Работа генератора в режиме непрерывной генерации

Подключите к основному выходу прибора 9 согласованную нагрузку сопротивлением 50 Ом.

Нажатием на кнопку «ФОРМА» на лицевой панели выберите форму выходного сигнала. Выбранная форма выходного сигнал отображается на экране 2.

2.3. Установка частоты выходного сигнала генератора

Нажмите кнопку «ЧАСТОТА», на табло зажжется светодиод «ЧАСТ». Установленное текущее значение частоты отображается на экране с указанием размерностей.

Установка частоты выходного сигнала осуществляется следующими способами:

Способ 1: прямым набором числового значения частоты и вводом соответствующей размерности (Гц, кГц, МГц).

Способ 2:

• кнопками < или < выберите корректируемый разряд;

• корректируемый разряд будет мигать несколько секунд;

• вращением регулятора влево или вправо установите необходимое значение частоты;

• для блокировки случайного изменения частоты нажмите кнопку «УДЕРЖ», на табло загорится индикатор «УДЕРЖ», кнопки ◀, ▶ и вращающийся регулятор будут блокированы.

В случае превышения допустимых пределов установки частоты выходного сигнала на экране в поле частоты появится надпись E01.

2.4. Установка уровня выходного сигнала

Нажмите кнопку «АМПЛ», на табло зажжется светодиод «АМПЛ». Установленное текущее значение уровня отображается на светодиодном индикаторе с указанием размерностей.

Установка уровня выходного сигнала осуществляется прямым набором числового значения уровня выходного сигнала и вводом соответствующей размерности (Vpp; Vrms; dBm) либо способом 2 (см.п.2.3).

В случае превышения допустимых пределов установки уровня выходного сигнала на индикаторе в поле уровня появится надпись Е03.

2.5. Установка асимметрии выходного сигнала

Обычно регулировка асимметрии используется для регулировки времени нарастания и спада сигнала треугольной формы или изменения скважности прямоугольного сигнала. Нажмите кнопку «АСИММ», на табло зажжется светодиод «АСИММ». Установленное текущее значение асимметрии отображается на светодиодном индикаторе в %.

Установка асимметрии выходного сигнала осуществляется прямым набором числового значения асимметрии и нажатием на кнопку «DEG/%» либо способом 2 (см.п.2.3).

В случае превышения допустимых пределов установки величины асимметрии выходного сигнала на индикаторе появится надпись Е07.

2.6. Установка смещения постоянной составляющей выходного сигнала

Нажмите кнопку «СМЕЩ», на табло зажжется светодиод «СМЕЩ». Установленное текущее значение смещения постоянной составляющей отображается на светодиодном индикаторе.

Установка смещения постоянной составляющей выходного сигнала осуществляется прямым набором числового значения уровня выходного сигнала и нажатием на кнопку «Vpp» либо способом 2 (см.п.2.3).

В случае превышения допустимых пределов установки величины смещения выходного сигнала на индикаторе появится надпись E05.

2.7. Использование генератора качающей частоты ГКЧ

Существуют два способа задания параметров ГКЧ.

2.7.1. Задание начальной и конечной частот свипирования

Задание начальной и конечной частот свипирования.

1. Установите форму выходного сигнала.

2. Установите уровень выходного сигнала.

3. Нажатием на кнопку «ЛИН ГКЧ» или «ЛОГ ГКЧ» выберите режим линейного или логарифмического свипирования.

4. Нажатием на кнопку «МодГен» установите частоту свипирования одним из способов, применяемых для установки частоты выходного сигнала. В случае превышения допустимых пределов установки частоты свипирования на индикаторе в поле частоты появится надпись Е09.

5. Нажмите кнопку «СТАРТ» и введите начальную частоту свипирования одним из способов, применяемых для установки частоты выходного сигнала. В случае превышения допустимых пределов установки частоты на индикаторе в поле частоты появится надпись E01.

6. Нажмите последовательно кнопки «ПРЕФ» и «СТАРТ» и введите конечную частоту свипирования одним из способов, применяемых для установки частоты выходного сигнала. В случае превышения допустимых пределов установки частоты на индикаторе в поле частоты появится надпись E01.

7. Нажмите кнопку «СИМ» и при необходимости введите величину асимметрии модулирующего сигнала ГКЧ одним из способов, указанных выше.

8. Для запуска ГКЧ нажмите кнопку «МОД ВКЛ», на экране зажжется светодиод «Вкл». Для остановки ГКЧ нажмите еще раз кнопку «МОД ВКЛ», светодиод «Вкл» на экране погаснет.

| | | 1 аблица 11 4.2 | |
|----------------|-----------------------|------------------------|--|
| № поддиапазона | Диапазон частот | Дискретность индикации | |
| | | установки частоты | |
| Ι | 0,11,50 Гц | | |
| II | 1,51. 15,00 Гц | 0.01 Fu | |
| III | 15,01150,00 Гц | 0,011Ц | |
| IV | 150,01 Гц1,50000 кГц | | |
| V | 1.500115,0000 кГц | 0,1 Гц | |
| VI | 15,001150,ООО кГц | 1 Гц I | |
| VII | 150,01 кГц1,50000 МГц | 10 Гц | |
| VIII | 1,5001 .15,000 МГц | 100 Гц | |

Примечание: начальная и конечная частоты свипирования должны находиться в одном из поддиапазонов (табл. П 4.2).

 $T_{0} \in \Pi / 1$

2.7.2. Задание центральной частоты и полосы свипирования

1. – 4. – повторите соответствующие пункты из п. 2.7.1.

5. Нажмите последовательно кнопки «ПРЕФ» и «СИМ» (ЦЧ ГКЧ) и введите центральную частоту свипирования одним из способов, применяемых для установки частоты выходного сигнала. В случае превышения допустимых пределов установки частоты на индикаторе в поле частоты появится надпись E01.

6. Нажатием на кнопку «SPAN» установите полосу свипирования. В этом случае нижняя частота ГКЧ будет равна fн = fцч - $\Delta f/2$, верхняя частота ГКЧ будет равна fb = fцч + $\Delta f/2$, где fцч - центральная частота; Δf - полоса свипирования. 7. – 8. – повторите соответствующие пункты из п. 2.7.1. Примечание: если после нажатия кнопки «МОД ВКЛ» светодиод «ВКЛ» не светится, а на табло появляются мигающие цифры и символ «Е13» - это означает, что начальные и конечные частоты свипирования находятся в разных частотных поддиапазонах (табл. П 4.2). Выберите частоты ГКЧ таким образом, чтобы они находились в одном частотном диапазоне.

Более подробно о функциях амплитудной и частотной модуляции, режимах формирования пакетов, частотомера, преобразователя частота-напряжение и напряжение-частота, а также конфигурировании по протоколу RS-232 и записи профилей генератора сигналов специальной формы GFG -3015 можно узнать в руководстве по эксплуатации [14].

СОДЕРЖАНИЕ

_ _ .

| Лабораторная работа № 1 | |
|--|----|
| ЭЛЕМЕНТЫ И ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ | 1 |
| Лабораторная работа № 2 | |
| ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА | 14 |
| Лабораторная работа № 3 | |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ | |
| В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО | |
| СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА | 21 |
| Лабораторная работа № 4 | |
| ИССЛЕДОВАНИЕ RLC ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА | 31 |
| Лабораторная работа № 5 | |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА | |
| В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ | 41 |
| Лабораторная работа № 6 | |
| ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА | 51 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 62 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1 | 63 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 64 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3 | 68 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 4 | 85 |
| | |

Теоретические основы электротехники

Составители: Борисовский Андрей Петрович Дягилев Александр Александрович Круглов Сергей Александрович Мамонтов Евгений Васильевич Сережин Андрей Александрович

Редактор Н.А. Орлова Корректор С.В. Макушина Подписано в печать 10.05.15. Формат бумаги 60х84 1/16. Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,75. Тираж 70 экз. Заказ . Рязанский государственный радиотехнический университет. 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1. Редакционно-издательский центр РГРТУ.