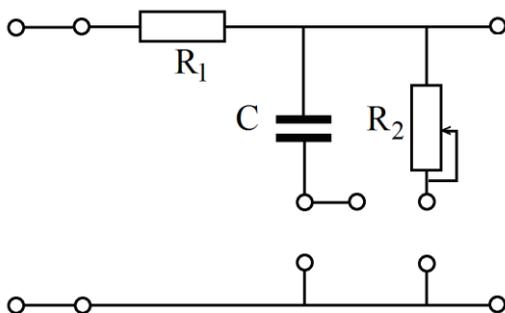


В.П. Литвиненко, Ю.В. Литвиненко

**ВВЕДЕНИЕ В СХЕМОТЕХНИКУ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Учебное пособие



Воронеж 2019

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

В.П. Литвиненко, Ю.В. Литвиненко

**ВВЕДЕНИЕ В СХЕМОТЕХНИКУ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Учебное пособие

Воронеж 2019

УДК 621.3.013(075.8)

ББК 31.211Я7

Л 641^я

***Рецензенты:** кафедра инфокоммуникационных систем и технологий Воронежского института МВД России (нач. кафедры д-р техн. наук, проф. О. И. Бокова); д-р техн. наук, проф. А. Б. Токарев*

Литвиненко В.П.

Введение в схемотехнику электрических цепей :
Л 641^я учеб. пособие / В. П. Литвиненко, Ю.В. Литвиненко.
Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет». – Воронеж: Изд-во ВГТУ,
2019. - 115 с.

Учебное пособие содержит теоретический материал и задания к лабораторным работам по дисциплине «Введение в схемотехнику электрических цепей». Рассматриваются вопросы описания электрических цепей, методы их расчета, измерительная аппаратура, простые электронные устройства.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 11.03.01 «Радиотехника» (профиль «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов»), дисциплине «Введение в схемотехнику электрических цепей».

Ил. 136. Табл. 5. Библиогр.: 9 назв.

УДК 621.3.013(075.8)

ББК 31.211я7

*Печатается по решению учебно-методического совета
Воронежского государственного технического университета*

© Литвиненко В. П., Литвиненко Ю. В., 2019

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», 2019

ВВЕДЕНИЕ

Радиотехника – отрасль науки и техники, связанная с использованием электромагнитных процессов в задачах связи и управления. Она разделяется на большое число направлений: радиосвязь, радиолокацию, радионавигацию, радиоуправление, радиоэлектронную борьбу (РЭБ) и т.д.

Дисциплина «Введение в схемотехнику электрических цепей» является подготовительной для изучения теории радиотехнических цепей и устройств. Пособие содержит необходимый теоретический материал и лабораторные задания.

Рассматриваются способы описания цепей, простые методы расчета цепей и измерения токов, напряжений и параметров элементов, осциллографические измерения, возможности схемотехнического моделирования.

При освоении материала необходимо овладеть основами расчета [1, 2] и техники измерений токов и напряжений в простых цепях.

Современная вычислительная техника предоставляет широкие возможности по расчету [3] и моделированию [4] электрических цепей. Необходимо освоить основы применения вычислительной техники для решения радиотехнических задач.

Изучение теории электрических цепей базируется на курсах высшей математики и раздела «Электричество и магнетизм» курса физики.

1. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

1.1. Заряд, ток, напряжение, мощность, энергия

Электрический заряд - это источник электрического поля, посредством которого заряды взаимодействуют друг с другом. Заряды могут быть положительными (ионы) и отрицательными (электроны и ионы). Величина заряда измеряется в кулонах (К).

Электрический ток - это направленное движение носителей заряда в твердом теле (проводнике, полупроводнике), среде ионизированного газа (лампы дневного света, газоразрядные электронные приборы) и вакууме (электронно-лучевые трубки).

Ток $i(t)$ равен отношению бесконечно малого заряда, переносимого в данный момент времени t через поперечное сечение проводника за бесконечно малый интервал времени dt к величине этого интервала,

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}. \quad (1.1)$$

Функцию времени $i(t)$ называют **мгновенным значением** тока, его величина в системе СИ измеряется в **амперах** (А) или во внесистемных единицах: миллиамперах ($1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$), микроамперах ($1 \text{ mA} = 10^{-6} \text{ A}$) и наноамперах ($1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$), значения приставок представлены в приложении 1.

Электрическим потенциалом φ в заданной точке пространства называют отношение потенциальной энергии электрического поля W заряда q в этой точке к величине заряда,

$$\varphi = \frac{W}{q}. \quad (1.2)$$

Энергия w - это энергия, затрачиваемая на перенос заряда из точки с потенциалом φ в точку с нулевым потенциалом.

Электрическим напряжением U между двумя точками называют разность потенциалов между ними.

Напряжение между точками 2 и 1 равно разности потенциалов φ_2 в точке 2 и φ_1 в точке 1,

$$u = u_{21} = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (1.3)$$

В система СИ оно измеряется в **вольтах** (В), или внесистемных единицах (киловольтах (кВ), милливольтмах (мВ) и микровольтах (мкВ)).

Для тока и напряжения задаются **положительные направления**, которые указываются стрелкой, как показано на рис. 1.1.

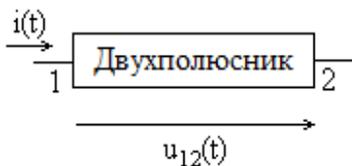


Рис. 1.1

Положительные направления выбираются произвольно **до начала расчетов**. Целесообразно выбирать их в **одном** направлении для каждого элемента цепи. Символам тока и напряжения присваиваются поясняющие индексы (напряжение $u_{12}(t)$ на рис. 1.1).

Если значения тока и напряжения положительны, то фактическое положительное направление совпадает с выбранным, а иначе оно противоположно.

Процессы в электрической цепи характеризуется **энергией** и **мощностью**. Бесконечно малая энергия dw перемещения бесконечно малого заряда dq между точками с напряжением $u = u_{12}$ в цепи на рис. 1.1 равна

$$dw = u \cdot dq, \quad (1.4)$$

а за время от t_0 до t

$$w(t, t_0) = \int_{t_0}^t u \cdot dq = \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau. \quad (1.5)$$

Для постоянных тока $i = I$ и напряжения $u = U$ энергия

равна $w(t, t_0) = UI(t - t_0)$ и пропорционально увеличивается с течением времени до бесконечности, так же, как и величина (1.5), что делает энергию неудобной характеристикой цепи на неограниченном временном интервале.

Этого недостатка лишена мощность электрических процессов в цепи.

Мгновенная мощность $p(t)$ в электрической цепи в момент времени t равна

$$p(t) = \frac{dw(t)}{dt} = u(t)i(t). \quad (1.6)$$

а для постоянного тока мощность не зависит от времени,

$$P = U \cdot I. \quad (1.7)$$

Мгновенная мощность $p(t)$ является функцией времени. При положительной мощности цепь потребляет энергию от источника, а при отрицательной - отдает ранее накопленную энергию.

Средняя мощность для **периодических** токов и напряжений определяется выражением

$$P_{CP} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t)i(t)dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t)dt, \quad (1.8)$$

а для постоянного тока соответственно

$$P_{CP} = P = U \cdot I. \quad (1.9)$$

Средняя мощность положительна, если в цепи отсутствуют источники электрической энергии.

Энергия измеряется в джоулях (Дж), а мощность – в ваттах (Вт).

1.2. Элементы электрической цепи

Элемент – это неделимая на выбранном уровне рассмотрения часть электрической цепи. В физической цепи (блоке питания, усилителе) присутствуют физические элементы (резисторы, конденсаторы и т.д.), которые могут иметь сложное физико-математическое описание.

При расчете цепи используются достаточно точные, простые и удобные **модели физических элементов**, которые в дальнейшем будем называть просто **элементами**. Они формируются на основе теоретических и экспериментальных представлений о взаимосвязях токов и напряжений.

Физические элементы цепи и их модели при отображении их на рисунках или чертежах имеют **условно-графические обозначения** в соответствии со стандартом РФ «Единая система конструкторской документации» (ЕСКД).

Простейшими физическими элементами электрической цепи являются резистор (его модель называют сопротивлением), конденсатор (модель - емкость) и катушка индуктивности (модель - индуктивность). Их условно-графические обозначения показаны на рис. 1.2 с использованием символов, обозначающих значение основного параметра элемента: R - сопротивление (Ом), C - емкость (Фарад, Ф) и L - индуктивность (Генри, Гн).

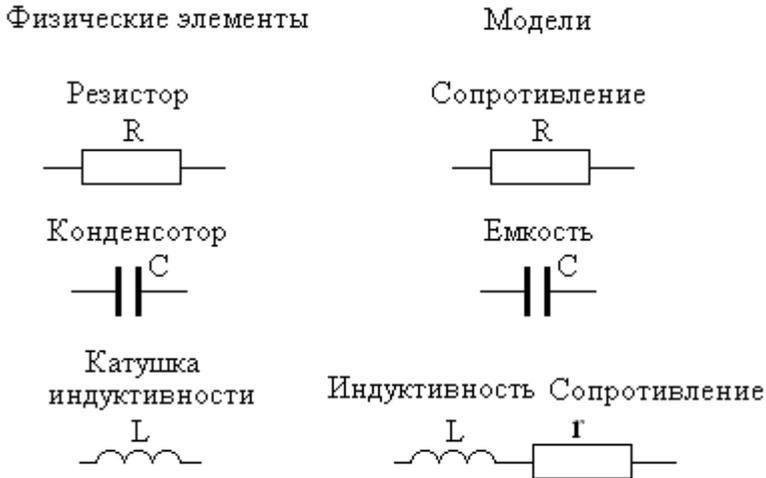


Рис. 1.2

1.3. Идеальные источники тока и напряжения

При воздействии на цепь источников электрической энергии в ней возникают токи и напряжения. Физические источники (батареи и аккумуляторы) формируют постоянные токи и напряжения. Электронные устройства - генераторы переменных токов и напряжений различной формы создают в цепи изменяющиеся во времени сигналы.

На зажимах (полюсах) **источников напряжения** присутствует разность потенциалов и через них протекает ток благодаря электрохимическим процессам и другим физическим явлениям. В физике действие этих процессов характеризуют **электродвижущей силой (ЭДС)**, измеряемой в вольтах.

Источник тока выдает в цепь **заданный ток**, который, протекая через внешнюю цепь (нагрузку), создает на его полюсах разность потенциалов (напряжение).

В теории цепей для расчета токов и напряжений используют **модели источников сигнала**. Простейшие модели называют **идеальными источниками**.

Идеальный источник напряжения – это источник, напряжение $u(t)$ на полюсах которого не зависит от протекающего через источник тока $i(t)$, его изображение показано на рис. 1.3а в виде окружности со стрелкой, указывающей положительное направление ЭДС $e(t)$.

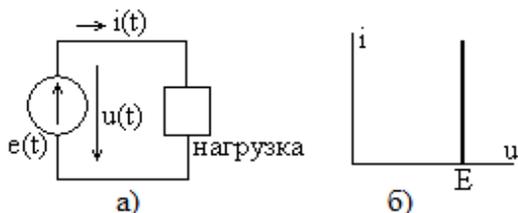


Рис. 1.3

На его полюсах присутствует напряжение $u(t)$, при указанных положительных направлениях равно ЭДС,

$$u(t) = e(t). \quad (1.10)$$

При совпадающих направлениях ЭДС и напряжения в формуле (1.10) появится знак минус.

При подключении к источнику напряжения нагрузки (рис. 1.3) в ней протекает ток $i(t)$. Свойства источника напряжения или тока описываются **вольтамперной характеристикой (ВАХ)** – зависимостью тока от напряжения $i(u)$. Для идеального источника постоянного напряжения с ЭДС E вольтамперная характеристика показана на рис. 1.3б. Как видно, при неограниченном увеличении тока отдаваемая в нагрузку мощность стремится к бесконечности, что и является признаком идеальности, в физических источниках это невозможно.

Для идеального источника переменного напряжения от тока не зависят все его параметры.

Идеальный источник тока – это источник, который вырабатывает ток $i(t)$, не зависящий от напряжения $u(t)$ на его полюсах, его графическое изображение показано на рис. 1.4а (окружность с указанным положительным направлением тока). При протекании тока через нагрузку на полюсах источника появляется напряжение $u(t)$ с показанным на рис. 4а направлением.

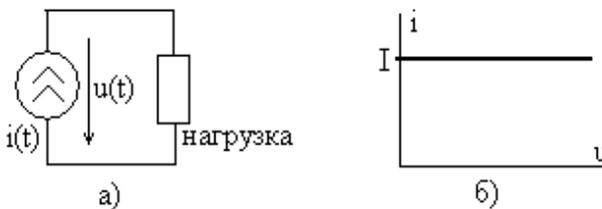


Рис. 1.4

На рис. 1.4б представлена ВАХ источника постоянного тока I . И в этом случае с неограниченным увеличением напряжения отдаваемая в нагрузку мощность стремится к бесконечности.

1.4. Основы топологического описания цепи

Электрическая цепь – это совокупность соединенных между собой элементов, свойства которых описываются в терминах **тока и напряжения**.

Физическое электронное устройство (цепь) состоит из различных физических элементов – резисторов, конденсаторов и т.д., каждый из которых имеет условно-графическое отображение согласно ЕСКД. Их соединение графически представляется **принципиальной схемой**, пример принципиальной схемы транзисторного усилителя показан на рис. 1.5. Точкой отмечены электрические соединения физических элементов.

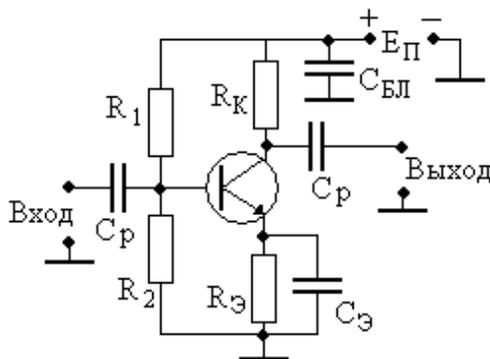


Рис. 1.5

Соединения моделей элементов, образующих электрическую цепь, называют **эквивалентной схемой** или **схемой замещения**. В ней физические элементы заменяются их моделями, которые могут состоять из одной или нескольких идеальных моделей (сопротивлений, емкостей, идеальных источников).

Резистор и конденсатор обычно отображаются идеальными моделями с теми же условно-графическими обозначениями (рис. 1.2). катушка индуктивности отображается идеальной индуктивностью L , в ряде случаев требуется дополнительно учитывать сопротивление потерь r (рис. 1.2).

Эквивалентная схема цепи является **топологическим описанием** модели физической цепи.

Возможны различные варианты **соединения элементов**.

Различают два простейших соединения двухполюсников: последовательное и параллельное. Более сложные соединения называют смешанными.

Последовательным называют соединение двухполюсников, при котором полюс одного подключен к полюсу другого (друг за другом), и в каждом из них протекает одинаковый ток. Пример последовательного соединения показан на рис. 1.6а. При последовательном соединении **сопротивления элементов складываются**.

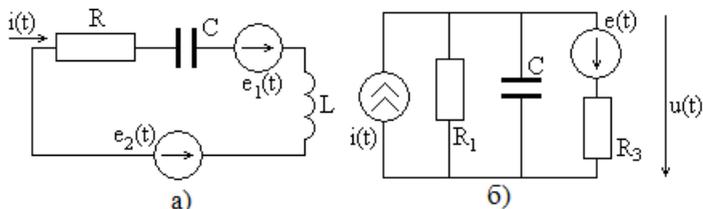


Рис. 1.6

Параллельным называют соединение двух и более элементов (или соединений элементов) с общей парой точек подключения. Напряжения на параллельно соединенных элементах одинаковы. Пример показан на рис. 1.6б. При параллельном соединении **складываются проводимости** элементов.

Смешанное соединение элементов нельзя рассматривать как простое последовательное или параллельное. В цепи со смешанным соединением элементов (рис. 1.7) выделяются **простые фрагменты** с последовательным соединением элементов ($e(t), R_1, R_2C_2$ и R_3L) или параллельным (например, к последовательно соединенным $e(t), R_1$ параллельно подключена емкость C_1).

На рис. 1.8 приведена принципиальная схема параллельного соединения катушки индуктивности и конденсатора

(такую цепь называют параллельным колебательным контуром) и ее эквивалентная схема (катушка индуктивности представляется последовательным соединением идеальной индуктивности и сопротивления).

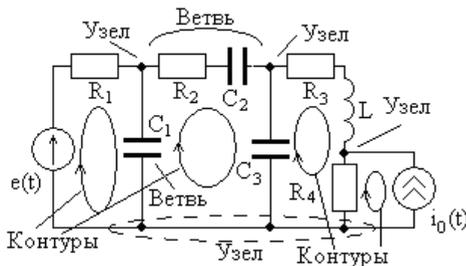


Рис. 1.7

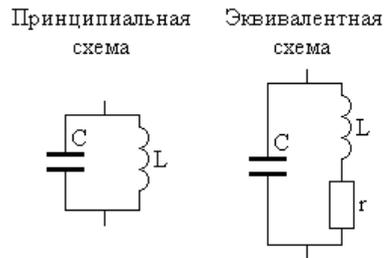


Рис. 1.8

В электрической цепи выделяются основные топологические элементы:

- **ветвь** – последовательное соединение нескольких, двухполюсников, в том числе и источников сигнала, в частном случае ветвь содержит один двухполюсный элемент;
- **узел** – точка подключения **трех и более** ветвей;
- **контур** – замкнутое (друг за другом) соединение двух и более ветвей.

Пример эквивалентной схемы электрической цепи с обозначением ветвей, узлов (отображаются жирными точками) и контуров показан на рис. 1.7. На схеме узел может представлять собой несколько точек соединения (такой распределенный узел на рис. 1.7 охвачен пунктирной линией).

При расчете электрических цепей большое значение имеют числа узлов q и ветвей p . В цепи на рис. 1.7 выделяют $q = 4$ узлов и $p = 7$ ветвей, в одной из которых присутствует идеальный источник тока.

2. ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Модель цепи постоянного тока

В цепи постоянного тока действуют постоянные напряжения и протекают постоянные токи. В этом случае индуктивность в цепи заменяется коротким замыканием, а емкость – разрывом (холостым ходом), а в модели используются только сопротивления.

В сопротивлении R напряжение U и ток I связаны уравнением **закона Ома**

$$U = RI \quad \text{или} \quad I = U / R = U \cdot G, \quad (3.1)$$

$G = 1/R$ - проводимость резистивного элемента (измеряется в сименсах, См).

Токи и напряжения в цепи связаны уравнениями законов Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма сходящихся в узле токов равна нулю, при этом втекающие токи записываются с плюсом, а вытекающие – с минусом.

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма напряжений на ветвях замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС источников напряжения, включенных в этот контур. Направление обхода контура выбирается по часовой стрелке, совпадающие с ним по направлению напряжения и ЭДС записываются со знаком плюс, а несовпадающие – минус.

2.2. Расчет цепи на основе закона Ома

Метод используется для расчета простых цепей с одним источником тока или напряжения и предусматривает вычисление сопротивлений (проводимостей) участков цепи, для которых известна или уже вычислена величина тока (или напряжения), с последующим определением по закону Ома неизвестного напряжения (или тока).

Все вычисления целесообразно проводить в международной системе единиц **СИ**.

Рассмотрим **резистивный делитель напряжения**, схема которого показана на рис. 2.1а при ЭДС $E = 15\text{В}$, $R_1 = 5\text{Ом}$, $R_2 = 10\text{Ом}$.

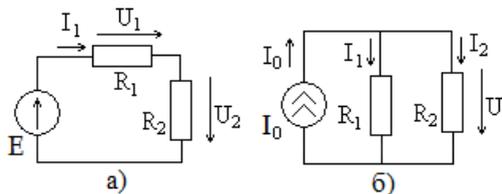


Рис. 2.1

Сопротивления R_1 и R_2 включены последовательно, тогда их общее сопротивление равно $R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 = 15\text{ Ом}$. По закону Ома для общего тока получим

$$I_1 = \frac{E}{R_{\text{общ}}} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{15}{15} = 1\text{ А},$$

тогда напряжения на элементах равны

$$U_1 = I_1 R_1 = E \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 15 \cdot \frac{5}{15} = 5\text{ В},$$

$$U_2 = I_1 R_2 = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 15 \cdot \frac{10}{15} = 10\text{ В}.$$

Как видно, напряжение источника делится в соотношении 1/3 и 2/3. Коэффициент деления K можно записать в виде

$$K = \frac{E}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{15}{10} = 1,5.$$

Резистивные делитель напряжения используются при реализации **вольтметров**.

Аналогично рассмотрим резистивный делитель тока, схема которого показана на рис. 2.1б при токе источника $I_0 = 1\text{А}$, $R_1 = 5\text{Ом}$, $R_2 = 10\text{Ом}$. При параллельном соединении сопротивлений общая проводимость равна сумме проводимо-

стей ветвей,

$$Y_{\text{ОБЩ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{5} + \frac{1}{10} = \frac{3}{10} \text{ См},$$

а для общего сопротивления получим

$$R_{\text{ОБЩ}} = \frac{1}{Y_{\text{ОБЩ}}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10}{3} = 3,33 \text{ Ом}$$

(формулу для сопротивления параллельного соединения двух резистивных элементов **полезно запомнить**).

По закону Ома определим напряжение на источнике тока

$$U = I_0 R_{\text{ОБЩ}} = I_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 1 \cdot \frac{10}{3} = 3,33 \text{ В},$$

а после этого токи ветвей

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = I_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10}{3 \cdot 5} = \frac{2}{3} = 0,667 \text{ А},$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = I_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{10}{3 \cdot 10} = \frac{1}{3} = 0,333 \text{ А}.$$

Как видно, ток источника делится в соотношении 2/3 и 1/3, коэффициент деления равен

$$K = \frac{I_0}{I_2} = \frac{1}{0,333} = 3.$$

Резистивный делитель тока используется при реализации **амперметров**.

Рассмотрим пример расчета цепи со смешанным соединением элементов. Схема цепи показана на рис. 2.2, ток идеального источника равен $I = 1 \text{ А}$, а сопротивления элементов $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 20 \text{ Ом}$.

Для определения токов ветвей I_1 , I_2 и напряжений на сопротивлениях U_1 , U_2 и U_3 вычислим общее сопротивление цепи $R_{\text{ОБЩ}}$ (параллельного соединения R_2 и ветви из последовательно соединенных сопротивлений R_1 и R_3),

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{10(5 + 20)}{5 + 10 + 20} = 7,14 \text{ Ом.}$$

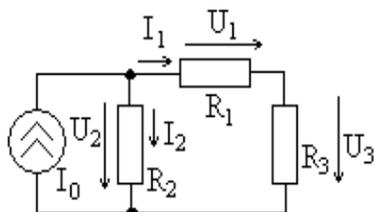


Рис. 2.2

По закону Ома найдем напряжение U_2 на полюсах источника тока (и на сопротивлении R_2)

$$U_2 = R_{\text{общ}} \cdot I_0 = 7,143 \cdot 1 = 7,14 \text{ В,}$$

а затем токи ветвей

$$I_1 = \frac{U_2}{R_1 + R_3} = \frac{7,143}{5 + 20} = 0,286 \text{ А, } I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{7,143}{10} = 0,714 \text{ А.}$$

Правильность расчета проверим с помощью первого закона Кирхгофа в виде $I_1 + I_2 = I_0$, тогда $I_1 + I_2 = 0,286 + 0,714 = 1 \text{ А}$, то есть результат совпадает с током источника.

Используем полученные токи ветвей для определения напряжений на сопротивлениях (величина U_2 уже найдена)

$$U_1 = R_1 I_1 = 5 \cdot 0,286 = 1,43 \text{ В, } U_3 = R_3 I_1 = 20 \cdot 0,286 = 5,72 \text{ В.}$$

На основании второго закона Кирхгофа $U_2 = U_1 + U_3$, тогда, складывая найденные напряжения, убеждаемся в его выполнении.

2.3. Мощность в цепи постоянного тока

Источник электрической энергии создает в цепи токи и напряжения, за счет которых в резистивных элементах потребляется мощность, преобразуемая ими в тепло.

Если через сопротивление R протекает постоянный ток I и на нем создается напряжение U , то потребляемая этим сопротивлением мощность с учетом (3.1) равна

$$P = I \cdot U = R \cdot I^2 = U^2 / R. \quad (3.2)$$

Мощность измеряется в **ваттах** (Вт).

Например, в цепи на рис 2.2 потребляемые сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 мощности соответственно равны

$$P_1 = I_1 \cdot U_1 = 0,409 \text{ Вт}, \quad P_2 = I_2 \cdot U_2 = 5,098 \text{ Вт}, \\ P_3 = I_1 \cdot U_3 = 1,636 \text{ Вт}.$$

Общая потребляемая ими мощность равна

$$P_{\text{общ}} = I_1 \cdot U_1 + I_2 \cdot U_2 + I_1 \cdot U_3 = 7,14 \text{ Вт}.$$

Определим мощность P_0 , **отдаваемую** источником тока в цепь,

$$P_0 = I_0 \cdot U_2 = 7,14 \text{ Вт},$$

которая, как видно, совпадает с общей потребляемой мощностью. Полученный результат является примером выполнения **условия баланса мощностей**: сумма мощностей, потребляемых в резистивных элементах цепи, равна сумме мощностей, отдаваемых в цепь всеми источниками.

2.4. Задания для самостоятельного решения

Задание 2.1. Используя закон Ома, вычислите напряжение U в цепях, схемы которых показаны на рис. 3.5 при $E_0 = 1\text{В}$, $I_0 = 5\text{мА}$, $R_1 = 1\text{кОм}$, $R_2 = 5\text{кОм}$, $R_3 = 10\text{кОм}$, $R_4 = 20\text{кОм}$.

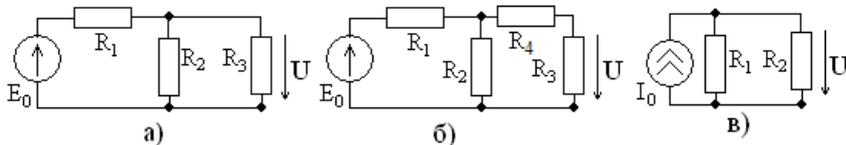


Рис. 2.3

3. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Гармонический сигнал

Гармонический сигнал $s(t)$ записывают в канонической форме

$$s(t) = S_m \cos(\omega t + \psi), \quad (3.1)$$

где S_m - амплитуда сигнала, ω - его круговая частота, а ψ - начальная фаза.

Временная диаграмма гармонического сигнала $s(t)$ показана на рис. 3.1.

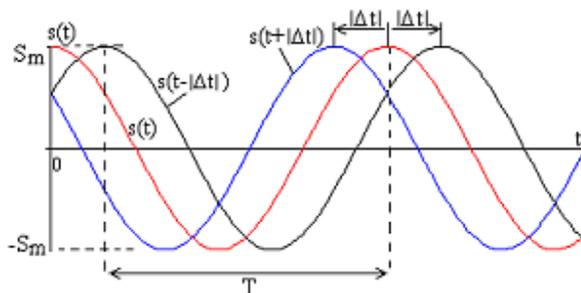


Рис. 3.1

Амплитуда гармонического колебания измеряется в вольтах или амперах.

Период повторения T определяет **циклическую частоту** f сигнала,

$$f = \frac{1}{T}, \quad (3.2)$$

которая измеряется в герцах (**Гц**). По физическому смыслу это число периодов колебаний в единицу времени (секунду).

Аргумент гармонической функции в (3.1) вида

$$\xi(t) = \omega t + \psi \quad (3.3)$$

является **полной фазой** колебания, она прямо пропорциональ-

на времени, а измеряется в радианах или градусах. При $t = 0$ из (3.1) полная фаза равна **начальной фазе** $\xi(0) = \psi$.

Круговая частота ω равна

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (3.4)$$

и является числом радиан, на которое увеличивается полная фаза гармонического колебания в единицу времени (1 с).

Начальная фаза измеряется в радианах или градусах. Она многозначна, так как период функции $\cos(\xi)$ равен 2π , и ее значения 30° , $(30^\circ + 360^\circ) = 390^\circ$ и $(30^\circ - 360^\circ) = -330^\circ$ являются эквивалентными. Для устранения неоднозначности принимают значения начальной фазы в интервале от 0 до 360° (от 0 до 2π) или от -180° до 180° (от $-\pi$ до π).

Начальная фаза гармонического сигнала определяется его сдвигом во времени на величину Δt относительно стандартной записи сигнала $s(t) = S_m \cos(\omega t)$ (рис. 3.1). Если $\Delta t > 0$, то функция $s(t + \Delta t)$ смещена влево по оси времени относительно $s(t)$, а если $s(t - \Delta t)$, то вправо. Положительные значения временного сдвига Δt отсчитываются в направлении увеличения времени t , а отрицательные – в сторону его уменьшения.

Согласно (3.1)

$$s(t) = S_m \cos(\omega t + \psi) = S_m \cos\left[\omega\left(t + \frac{\psi}{\omega}\right)\right] = S_m \cos[\omega(t - \Delta t)], \quad (3.5)$$

а сдвиг во времени Δt равен

$$\Delta t = -\frac{\psi}{\omega}. \quad (3.6)$$

В результате для начальной фазы можно записать

$$\psi = -\omega \cdot \Delta t. \quad (3.7)$$

Значение начальной фазы зависит от выбора начала отсчета времени ($t = 0$). При сдвиге начала отсчета времени меняется и начальная фаза.

Для двух гармонических сигналов $s_1(t) = S_m \cos(\omega \cdot t + \psi_1)$

и $s_2(t) = S_m \cos(\omega \cdot t + \psi_2)$ с начальными фазами ψ_1 и ψ_2 рассматривается **сдвиг фаз** между первым и вторым колебаниями,

$$\varphi = \psi_1 - \psi_2. \quad (3.8)$$

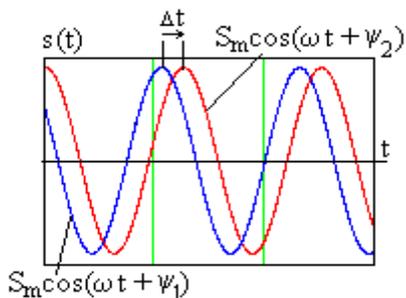


Рис. 3.2

На рис. 3.2 представлены два колебания с начальными фазами ψ_1 и ψ_2 , при этом $\psi_1 > \psi_2$ и $\varphi = \psi_1 - \psi_2 > 0$. Как видно, первый сигнал **опережает по фазе** второй (возникает раньше по времени) или второй **отстает по фазе** от первого. Сдвиг фаз $\varphi = \psi_1 - \psi_2$ определяется смещением Δt этих сигналов во времени,

$$\varphi = -\omega \Delta t, \quad (3.9)$$

причем положительные величины временного сдвига отсчитываются в положительном направлении оси времени. Гармонический сигнал можно задать и в неканонической форме, которую всегда требуется преобразовать к виду (3.1), в противном случае начальная фаза будет определена неправильно. Преобразования тригонометрических функций показаны в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Исходный сигнал	Преобразованный сигнал	Начальная фаза
$S_m \sin(\omega t + \psi)$	$S_m \cos(\omega t + \psi - \pi/2)$	$\psi - \pi/2$
$-S_m \sin(\omega t + \psi)$	$S_m \cos(\omega t + \psi + \pi/2)$	$\psi + \pi/2$
$-S_m \cos(\omega t + \psi)$	$S_m \cos(\omega t + \psi \pm \pi)$	$\psi \pm \pi$

3.2. Осциллографические измерения

Значения параметров сигнала можно измерить с помощью электронного осциллографа.

На рис. 3.5 изображен пример осциллограммы (временной диаграммы) наблюдаемого сигнала и задана координатная сетка (как на экране осциллографа).

Шаг сетки по вертикали равен 1В на деление, измеренная амплитуда составляет 2,7 деления, а ее величина равна $U=2,7В$. По горизонтали (оси времени) шаг сетки равен 1 мс на одно деление, тогда период сигнала равен 3,1 деления или $T=3,1$ мс. Найдем циклическую частоту сигнала

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3,1 \cdot 10^{-3}} = 323 \text{ Гц}$$

и затем круговую частоту

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{3,1 \cdot 10^{-3}} = 2,03 \cdot 10^3 \text{ рад/с.}$$

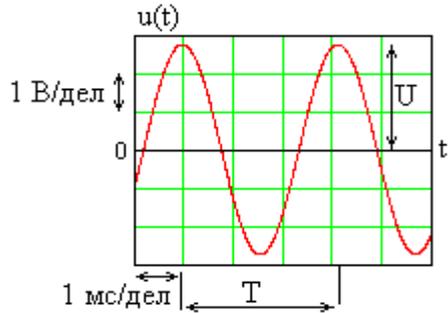


Рис. 3.5

Размах сигнала – это разница по вертикали между его максимальным и минимальным значениями, его удобно определять непосредственно по экрану осциллографа. У гармонического сигнала размах равен удвоенной амплитуде.

При измерении сдвига фаз между двумя гармоническими сигналами на экране осциллографа наблюдаются две гармонических временных диаграммы (рис. 3.6а).

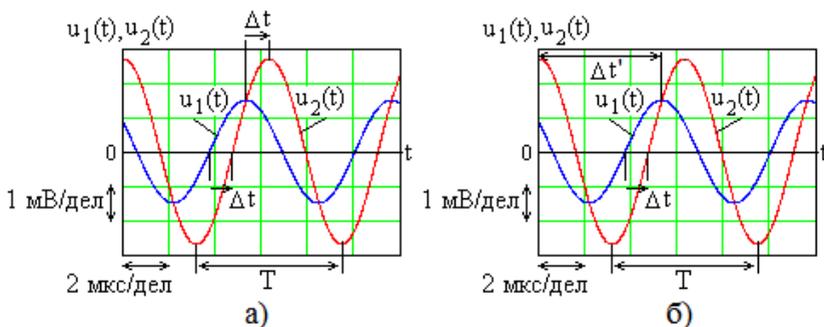


Рис. 3.6

Их взаимное смещение Δt не зависит от выбора начала отсчета времени, что дает возможность измерить сдвиг фаз φ одного сигнала относительно другого, выбранного в качестве опорного.

Для измерения сдвига фаз первого напряжения $u_1(t) = U_{m1} \cos(\omega t + \psi_1)$ относительно второго (опорного) напряжения $u_2(t) = U_{m2} \cos(\omega t + \psi_2)$ по временной диаграмме рис. 3.6а получим смещение во времени $\Delta t = -0,5$ деления или $\Delta t = -1$ мкс (отрицательная величина смещения означает, что первый сигнал сдвинут по сравнению с опорным влево, то есть его максимум появляется раньше по времени).

Период T сигналов равен 6,28 мкс, а круговая частота

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{6,28 \cdot 10^{-6}} = 1 \cdot 10^6 \text{ рад/с,}$$

тогда согласно (3.9) фазовый сдвиг равен $\varphi = \psi_1 - \psi_2 = -\omega \Delta t = 1$ рад, то есть напряжение $u_1(t)$ **опережает по фазе** $u_2(t)$ а 1 рад или 57° .

Если опорным сигналом является $u_1(t)$, то сдвиг по времени сдвиг второго напряжения $u_2(t)$ будет равен $\Delta t = 1$ мкс, а сдвиг фаз $\varphi = \psi_2 - \psi_1 = -1$ рад или -57° . Это говорит о том, что $u_2(t)$ **отстает** по фазе от $u_1(t)$ на 1 рад.

Смещение по времени напряжения $u_1(t)$ относительно $u_2(t)$ на рис. 3.6а можно определить иначе, как показано на рис. 3.6б, в этом случае $\Delta t' = 2,64$ деления сетки или 5,28 мкс. Полученное значение $\Delta t'$ больше Δt на величину периода T , при этом сдвиг фаз будет равен $\varphi = \psi_1 - \psi_2 = -\omega \Delta t' = -5,28$ рад. Как видно, напряжение $u_1(t)$ **отстает по фазе** от опорного $u_2(t)$ на 5,28 рад, что совпадает с полученным ранее результатом, отличающимся от него на величину 2π . Чтобы получать однозначные результаты расчета фазового сдвига, его величину целесообразно выбирать в интервале от $-\pi$ до π ($\pm 180^\circ$) или от 0 до 2π (соответственно от 0 до 360°).

3.3. Числовые значения сигналов

Периодический сигнал произвольной формы $s(t)$ (ток $i(t)$ или напряжение $u(t)$) полностью определяется функцией времени на интервале периода. Такие значения сигнала $s(t)$ называют **мгновенными**. Например, для гармонического тока $i(t)$ его мгновенные значения записываются в виде $i(t) = 5 \cos(10^6 t + 30^\circ)$ мА.

На практике широко используются различные числовые значения сигналов.

Период повторения T измеряется в секундах (с).

Циклическая частота $f = 1/T$, измеряется в герцах (Гц).

Круговая частота $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, измеряется в радианах в секунду (рад/с).

Амплитуда измеряется в физических единицах сигнала - вольтах или амперах. Применительно к гармоническому сигналу это максимальное отклонение от нулевого уровня или половина размаха (разности между максимальным и минимальным значениями).

Среднее значение (постоянная составляющая) сигнала S_{CP} определяется интегралом

$$S_{CP} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t) dt. \quad (3.10)$$

Оно характеризует постоянный сигнал, который присутствует в рассматриваемом переменном сигнале. Для любого гармонического сигнала его среднее значение всегда равно нулю и не является информативным.

Действующее (среднеквадратическое) значение сигнала равно

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s^2(t) dt} \quad (3.11)$$

и измеряется в единицах сигнала.

Действующее значение переменного сигнала – это такое эквивалентное значение постоянного тока или напряжения, которое выделяет в нагрузке (сопротивлении R) ту же мощность, что и исходный переменный сигнал.

Применительно к гармоническому сигналу

$$S_{\text{д}} = \frac{S_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot S_m \text{ или } S_m = \sqrt{2} S_{\text{д}} = 1,41 \cdot S_{\text{д}}. \quad (3.12)$$

Шкалы почти всех измерителей уровня переменного сигнала (амперметров и вольтметров) градуируются в действующих значениях гармонического сигнала. В электрической силовой сети дома или в лаборатории действующее значение гармонического напряжения равно 220В, его частота 50Гц, а амплитуда $U_m = 220\sqrt{2} = 311\text{В}$.

3.4. Мощность гармонических сигналов

Рассмотрим двухполосник с активными и реактивными элементами (рис. 3.7). Гармонические ток и напряжение имеют вид:

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \cos(\omega t + \psi), \\ u(t) &= U_m \cos(\omega t + \psi), \end{aligned} \quad (3.13)$$

тогда для мгновенной мощности получим

$$\begin{aligned} p(t) &= i(t)u(t) = I_m U_m \cos(\omega t + \psi_i) \cos(\omega t + \psi_u) \\ &= \frac{I_m U_m}{2} [\cos(\psi_u - \psi_i) + \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)]. \end{aligned} \quad (3.14)$$

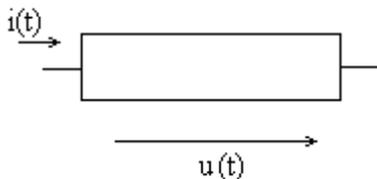


Рис. 3.7

Средняя мощность P_{CP} , потребляемая цепью от источника, равна

$$P_{CP} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt. \quad (3.15)$$

Для гармонических сигналов получим

$$P_{CP} = \frac{I_m U_m}{2} \cos(\psi_u - \psi_i) = \frac{I_m U_m}{2} \cos(\varphi) = I_D U_D \cos(\varphi), \quad (3.16)$$

где

$$\varphi = \psi_u - \psi_i \quad (3.17)$$

- сдвиг фаз между напряжением и током.

Величину $\cos(\varphi)$ в (3.16) рассматривают как **коэффициент мощности**.

В **реактивной цепи**, состоящей только из индуктивностей и емкостей, $\varphi = \pm 90^\circ$ то есть $\cos(\varphi) = 0$ и $P_{CP} = 0$ - идеальная реактивная цепь **не потребляет** мощности. В реальной цепи (в катушке индуктивности, конденсаторе и т. д.) всегда имеются потери мощности.

Мощность потребляется только резистивными элементами, поэтому если в двухполюснике на рис. 3.7 присутствуют **только сопротивления**, то $\varphi = 0$, $\cos(\varphi) = 1$ и потребляемая **активным двухполюсником** мощность равна

$$P_{CP} = \frac{I_m U_m}{2} = I_D U_D = I_D^2 R_{ОБЩ} = \frac{U_D^2}{R_{ОБЩ}}, \quad (3.18)$$

где $R_{ОБЩ}$ - общее сопротивление активного двухполюсника.

Для любого двухполюсника

$$P_{CP} = \sum_k P_k, \quad (3.19)$$

P_k - мощность, потребляемая k -м сопротивлением. Выражение (3.19) называют **условием баланса мощности**.

На рис. 3.8а показан пример резистивной цепи из трех сопротивлений, для которой

$$P_{CP} = I_{D1} U_D = P_1 + P_2 + P_3 = I_{D1} U_{D1} + I_{D2} U_{D2} + I_{D3} U_{D2}$$

(фазы всех токов и напряжений одинаковы).

В цепи на рис. 3.8б сопротивление R_2 заменено на емкость C , которая не потребляет мощности от гармонического источника $e(t)$, тогда условие баланса мощности примет вид

$$P_{CP} = I_{Д1}U_{Д} \cos(\varphi) = P_1 + P_3 = I_{Д1}U_{Д1} + I_{Д3}U_{Д2},$$

φ - сдвиг фаз между общим напряжением и током.

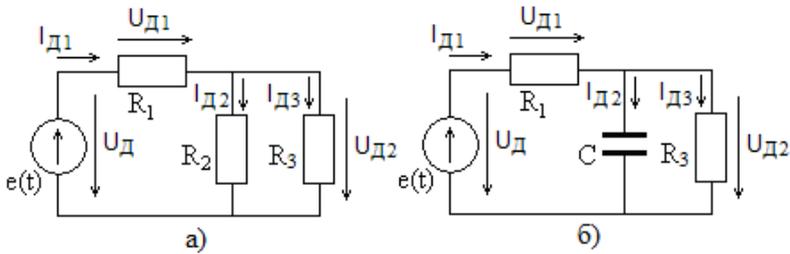


Рис. 3.8

Простые методы расчета токов и напряжений будут рассмотрены далее.

3.5. Задания для самостоятельного решения

Задание 3.1. На рис. 3.9а изображен гармонический сигнал и задана масштабная сетка по горизонтали 0,2 мкс/деление и по вертикали 0,5 В/деление. Найдите период и частоту повторения (в герцах и радианах в секунду), а также начальную фазу (в радианах и градусах). Запишите функцию времени, описывающую этот сигнал.

Задание 3.2. На рис. 3.9б представленные на экране осциллографа гармонические сигналы.

Вычислите сдвиг фаз первого колебания относительно второго (опорного) при указанных в задании 3.1 значениях цены деления сетки по вертикали и горизонтали.

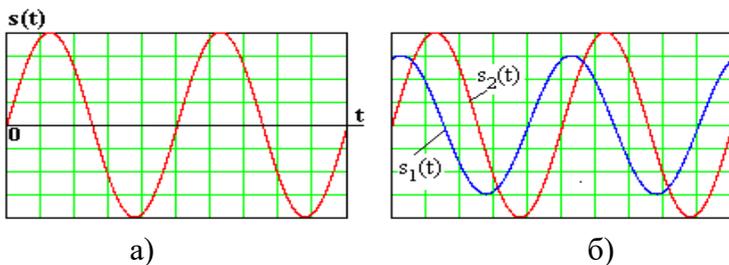


Рис. 3.9

Задание 3.3. Определите амплитуды, действующее значения и начальные фазы напряжений:

$$u(t) = 5 \cdot \cos(1000 \cdot t + 1)B,$$

$$i(t) = 10 \cdot \cos(20000 \cdot t - \pi/2)A,$$

$$u(t) = -4 \cdot \sin(1000 \cdot t - 10^0)B.$$

Задание 3.4. Вычислите сдвиги фаз гармонического сигнала $s_1(t)$ относительно $s_2(t)$:

1) $s_1(t) = 5 \cdot \cos(1000 \cdot t + 30^0)$, $s_2(t) = -10 \cdot \cos(1000 \cdot t + 30^0)$;

2) $s_1(t) = 5 \cdot \sin(1000 \cdot t + 30^0)$, $s_2(t) = 5 \cdot \cos(1000 \cdot t + 30^0)$;

3) $s_1(t) = 10 \cdot \cos(1000 \cdot t - \pi/2)$, $s_2(t) = -10 \cdot \cos(1000 \cdot t + \pi/2)$;

4) $s_1(t) = 5 \cdot \sin(1000 \cdot t + 1)$, $s_2(t) = -10 \cdot \sin(1000 \cdot t + 2)$.

4. РАСЧЕТ ГАРМОНИЧЕСКИХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

4.1. Расчет сопротивлений и проводимостей

Гармонические токи и напряжения в линейной электрической цепи рассчитываются **методом комплексных амплитуд**, который рассматривается в дисциплине «Основы теории цепей».

В дальнейшем будем рассматривать простые цепи и упрощенные методы расчета на основе закона Ома.

Модель резистора представляется активным сопротивлением R или проводимостью $G = 1/R$ (табл. 4.1). Гармонические напряжение и ток в сопротивлении **синфазны** (имеют одинаковые начальные фазы).

Свойства реактивных элементов L и C описываются их реактивными сопротивлениями X_L , X_C или проводимостями B_L , B_C соответственно, их значения приведены в табл. 4.1,

$$\omega = 2\pi f \quad (4.1)$$

- круговая частота, f - циклическая частота источника сигнала.

Реактивные сопротивления измеряются в Омах (Ом), а проводимости – в Сименсах (См).

Таблица 4.1

Элемент	Сопротивление	Проводимость	Модуль сопротивления	Модуль проводимости	φ рад
R	R	$G = 1/R$	R	$G = 1/R$	0
L	$X_L = \omega L$	$B_L = -\frac{1}{\omega L}$	$X_L = \omega L$	$B_L = \frac{1}{\omega L}$	$\pi/2$
C	$X_C = -\frac{1}{\omega C}$	$B_C = \omega C$	$X_C = \frac{1}{\omega C}$	$B_C = \omega C$	$-\pi/2$

Сдвиги фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i$ между напряжением и током указаны в последнем столбце табл. 4.1.

Для цепи на рис. 4.1а с последовательным соединением сопротивления R и емкости C модуль ее полного сопротивления равен

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + |X_C|^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (4.2)$$

Сдвиг фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i$ между напряжением и током определяется выражением

$$\varphi_1 = -\arctg\left(\frac{1}{\omega CR}\right), \quad (4.3)$$

то есть **ток опережает по фазе напряжение** на угол от 0 до 90° .

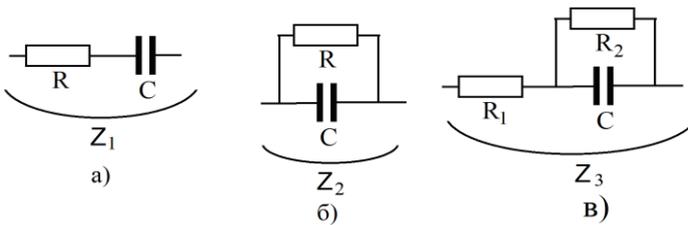


Рис. 4.1

В резистивно-емкостной цепи на рис. 4.1б с параллельным соединением тех же элементов модуль полной проводимости равен

$$Y_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + |b_C|^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C)^2} = \frac{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}{R}. \quad (4.4)$$

а модуль полного сопротивления можно записать в виде

$$Z_2 = \frac{R|X_C|}{\sqrt{R^2 + |X_C|^2}} = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}. \quad (4.5)$$

Как видно,

$$Z_2 = \frac{1}{Y_2}. \quad (4.6)$$

Сдвиг фаз между напряжением и током в цепи на рис. 4.1б равен

$$\varphi_2 = -\arctg(\omega CR). \quad (4.7)$$

В более сложном случае смешанной цепи на рис. 4.1в методом комплексных амплитуд получим

$$Z_3 = \sqrt{\left[R_1 + \frac{R_2}{1 + (\omega CR_2)^2} \right]^2 + \left[\frac{\omega CR_2^2}{1 + (\omega CR_2)^2} \right]^2}. \quad (4.8)$$

Нетрудно убедиться, что непосредственного **суммирования модулей сопротивлений или проводимостей не происходит**.

Сдвиг фаз между напряжением и током в цепи на рис. 4.1 в равен

$$\varphi_3 = -\arctg\left(\frac{\omega CR_2^2}{R_1 + R_2 + (\omega CR_2)^2 R_1} \right). \quad (4.9)$$

Как видно, для всех резистивно-емкостных цепей на рис. 4.1 сдвиг фаз $\varphi < 0$, следовательно **ток опережает по фазе напряжение**.

Применительно к резистивно-индуктивным цепям на рис. 4.2 можно записать:

- для последовательной цепи на рис. 4.2а

$$Z_4 = \sqrt{R^2 + |X_L|^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (4.10)$$

$$\varphi_4 = \arctg\left(\frac{\omega L}{R} \right); \quad (4.11)$$

- для параллельной цепи на рис. 4.2б

$$Y_5 = \sqrt{\left(\frac{1}{R} \right)^2 + |b_L|^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R} \right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L} \right)^2} = \frac{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}{\omega LR} \quad (4.12)$$

или

$$Z_5 = \frac{R|X_L|}{\sqrt{R^2 + |X_L|^2}} = \frac{\omega LR}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{1}{Y_5}, \quad (4.13)$$

$$\varphi_5 = \arctg\left(\frac{R}{\omega L}\right); \quad (4.14)$$

- для смешанной цепи на рис. 4.2в

$$Z_6 = \sqrt{\left[R_1 + \frac{R_2(\omega L)^2}{(R_2)^2 + (\omega L)^2}\right]^2 + \left[\frac{\omega LR_2^2}{(R_2)^2 + (\omega L)^2}\right]^2}, \quad (4.15)$$

$$\varphi_6 = \arctg\left[\frac{\omega LR_2^2}{(R_1 + R_2)(\omega L)^2 + R_1 R_2^2}\right]. \quad (4.16)$$

В резистивно-индуктивной цепи на рис. 4.2 сдвиг фаз $\varphi > 0$, следовательно **напряжение опережает по фазе ток**.

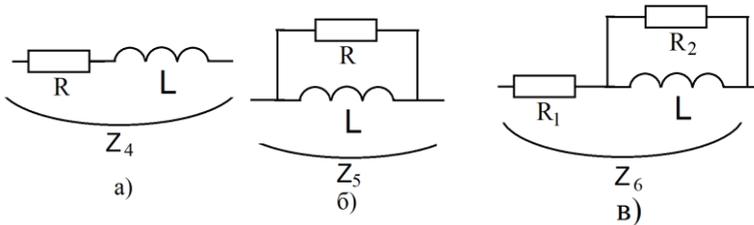


Рис. 4.2

На рис. 4.3 показаны цепи с двумя реактивными элементами L и C .

Цепь на рис. 4.3а называют **последовательным колебательным контуром**, модуль его полного сопротивления равен

$$Z_7 = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (4.17)$$

а сдвиг фаз между общим напряжением и током цепи определяется выражением

ниже выражение

$$Z_9 = \frac{\sqrt{L/C}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (4.23)$$

Для этой цепи сдвиг фаз между напряжением и током запишется в виде

$$\varphi_9 = -\arctg\left[\frac{R}{\omega L}\right] - \arctg\left[\frac{1}{R}\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)\right]. \quad (4.24)$$

Как видно, в RLC цепях фазовый сдвиг может быть положительным и отрицательным.

Полное сопротивление цепи с реактивными элементами зависит от частоты. Результаты расчета зависимостей от частоты модуля полного сопротивления и фазового сдвига для цепей на рис. 4.1а и рис. 4.1в при $R = R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 2$ кОм и $C = 1$ нФ показаны на рис. 4.4 и рис. 4.5 соответственно.

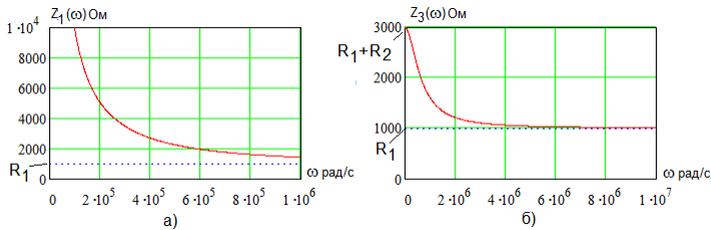


Рис. 4.4

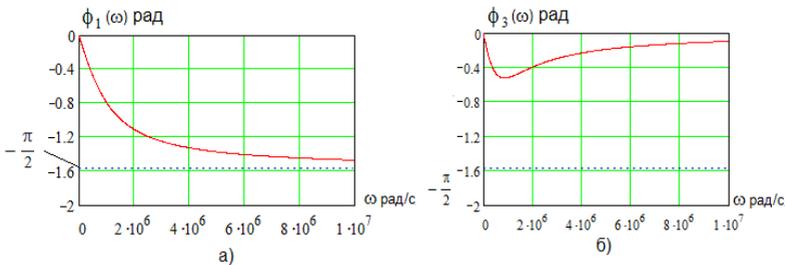


Рис. 4.5

Аналогичные расчеты для колебательных контуров на рис. 4.3а и рис. 4.3б показаны на рис. 4.6 и рис. 4.7 соответственно при $R=1\text{кОм}$, $C=1\text{нФ}$ и $L=1\text{мГн}$.

В колебательных контурах зависимость от частоты модуля полного сопротивления имеет экстремальный характер. В последовательном контуре на частоте $\omega_0=1/\sqrt{LC}=10^6$ рад/с наблюдается минимум сопротивления, равный R , а в параллельном контуре – максимум, также равный R (рис. 4.6). Сдвиг фаз изменяется от $-\pi/2$ до $\pi/2$ и при переходе частоты через значение ω_0 меняет знак (как показано на рис. 4.7)

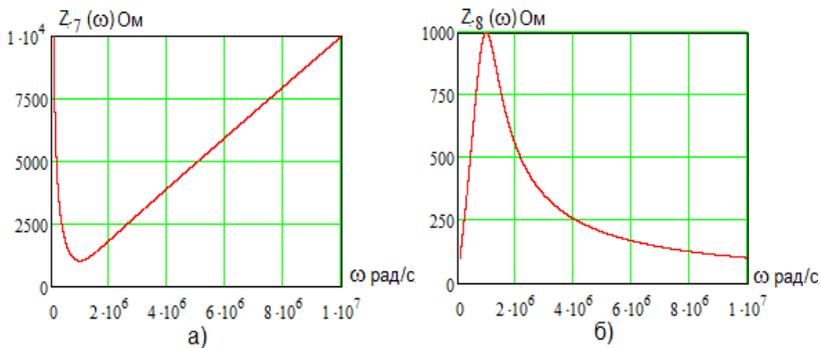


Рис. 4.6

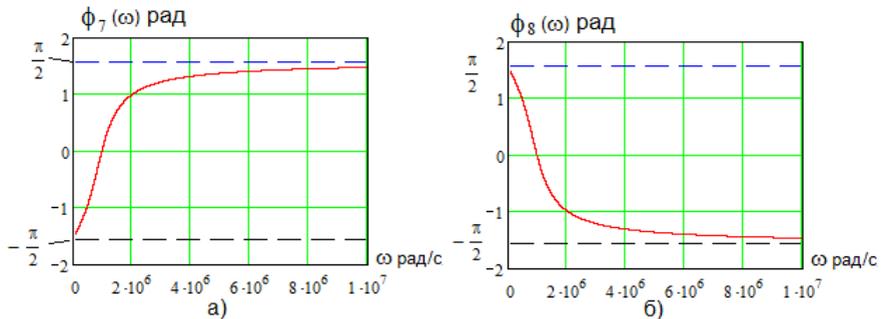


Рис. 4.7

4.2. Расчет токов и напряжений на основе закона Ома

Амплитудные или действующие значения напряжения U и тока I двухполюсника на рис. 4.8 связаны законом Ома

$$U = Z \cdot I \text{ или } I = Y \cdot U, \quad (4.25)$$

где Z и Y - модули полного сопротивления и проводимости двухполюсника.

Рассмотрим цепь на рис. 4.9 при амплитуде ЭДС источника $E = 10\text{В}$ с нулевой начальной фазой $\psi_e = 0$ и частотой $f = 100$ кГц, $\omega = 2\pi f = 6,283 \cdot 10^5$ рад/с, в которой модуль полного сопротивления согласно (4.2) равен

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (4.26)$$

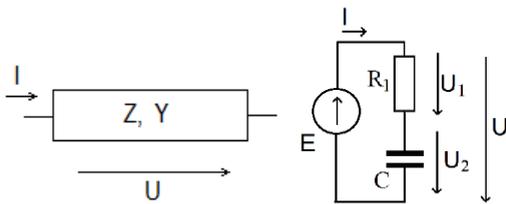


Рис. 4.8

Рис. 4.9

При $R = 1$ кОм и $C = 1$ нФ получим $Z = 1,88$ кОм и $\varphi = -0,561$ рад. По закону Ома амплитуда тока равна

$$I = \frac{E}{Z} = 5,32 \text{ мА},$$

тогда амплитуды напряжений на сопротивлении U_1 и емкости U_2 равны

$$U_1 = R \cdot I = 5,32 \text{ В и } U_2 = \frac{1}{\omega C} I = 8,467 \text{ В}.$$

Сдвиг фаз между общим напряжением и током согласно (4.3) определяется выражением

$$\varphi_1 = -\arctg\left(\frac{1}{\omega CR}\right) = -1,01 \text{ рад},$$

тогда для начальной фазы тока с учетом $\psi_e = \psi_u = 0$ получим

$$\psi_i = \psi_u - \psi_1 = -\psi_1 = 1,01 \text{ рад},$$

Согласно табл. 4.1 начальная фаза напряжения на сопротивлении R равна $\psi_1 = \psi_i = 1,01$ рад, а на емкости C соответственно $\psi_2 = \psi_i - \pi/2 = -0,561$ рад.

В результате получим выражения для мгновенных значений тока и напряжений в цепи на рис. 4.9:

$$u(t) = e(t) = E \cos(\omega t + \psi_e) = 10 \cos(6,283 \cdot 10^5 t) \text{ В};$$

$$i(t) = I \cos(\omega t + \psi_i) = 5,32 \cos(6,283 \cdot 10^5 t + 1,01) \text{ мА};$$

$$u_1(t) = U_1 \cos(\omega t + \psi_1) = 5,32 \cos(6,283 \cdot 10^5 t + 1,01) \text{ В};$$

$$u_2(t) = U_2 \cos(\omega t + \psi_2) = 8,467 \cos(6,283 \cdot 10^5 t - 0,561) \text{ В}.$$

На рис. 4.10 приведены временные диаграммы полученных напряжений. Нетрудно убедиться, что

$$u(t) - u_1(t) - u_2(t) = 0,$$

то есть второй закон Кирхгофа **выполняется для мгновенных значений напряжений**.

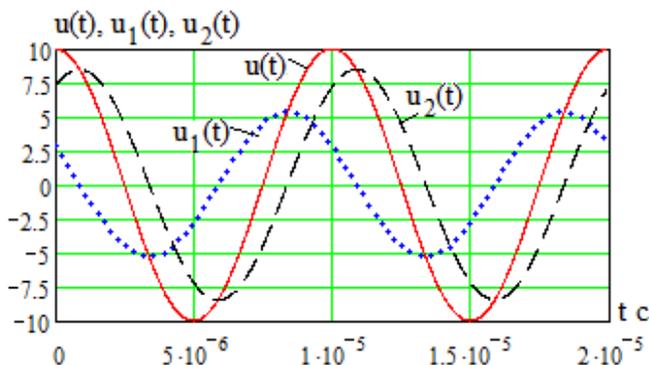


Рис. 4.9

Сумма амплитуд напряжений на элементах цепи на

рис. 4.9 $U_1 + U_2 = 13,79\text{В}$, что не равно ЭДС источника $E = 10\text{ В}$. Таким образом, второй закон Кирхгофа **не применим** для амплитудных и действующих значений напряжений в цепях с реактивными элементами, что обусловлено различными начальными фазами этих гармонических колебаний.

Рассмотрим резистивно-емкостную цепь на рис. 4.10 при $E = 10\text{В}$, $\psi_e = 0$, $R_1 = 1\text{ кОм}$, $R_2 = 2\text{ кОм}$, $C = 1\text{ нФ}$ и $f = 100\text{ кГц}$.

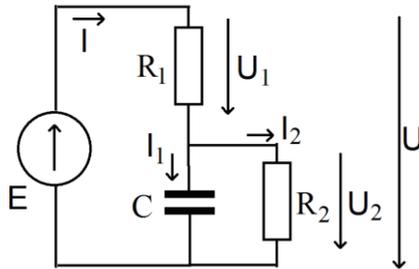


Рис. 4.10

Модуль полного сопротивления цепи на рис. 4.10 согласно (4.8) равен

$$Z_3 = \sqrt{\left[R_1 + \frac{R_2}{1 + (\omega CR_2)^2} \right]^2 + \left[\frac{\omega CR_2^2}{1 + (\omega CR_2)^2} \right]^2} = 2,025\text{ кОм}, \quad (4.8)$$

а сдвиг фаз между общим напряжением и током (4.9)

$$\varphi_3 = -\arctg\left(\frac{\omega CR_2^2}{R_1 + R_2 + (\omega CR_2)^2 R_1} \right) = -0,502\text{ рад}. \quad (4.9)$$

По закону Ома амплитуда тока определяется выражением

$$I = \frac{E}{Z_3} = 4,938\text{ мА},$$

Определим амплитуду напряжения на сопротивлении R_1

$$U_1 = R_1 \cdot I = 4,938\text{ В},$$

а с учетом выражения для сопротивления параллельного соединения R_2 и C (4.5) для амплитуды напряжения U_2 получим

$$U_2 = I \frac{R_2}{\sqrt{1 + (\omega CR_2)^2}} = 4,938 \cdot 10^{-3} \cdot 1,245 \cdot 10^3 = 6,149 \text{ В.}$$

Сумма $U_2 + U_2$, равная 11,087 В, не совпадает с амплитудой U напряжения источника 10 В.

По закону Ома амплитуды токов в параллельно соединенных элементах R_2 и C равны

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = 3,075 \text{ мА} \text{ и } I_1 = U_2 \omega C = 3,864 \text{ мА,}$$

их сумма равна 6,939 мА, что не равно общему току цепи $I = 4,938 \text{ мА}$.

Как видно, первый и второй законы Кирхгофа **не применимы для амплитудных и действующих значений токов и напряжений**.

Определим начальные фазы токов и напряжений.

Начальная фаза общего напряжения $u(t)$ совпадает с фазой источника $\psi_u = \psi_e = 0$, тогда начальная фаза общего тока $i(t)$ равна

$$\psi_i = \psi_u - \varphi_3 = -\varphi_3 = 0,502 \text{ рад.}$$

Фаза ψ_{u1} напряжения $u_1(t)$ на сопротивлении R_1 совпадает с фазой общего тока (табл. 4.1)

$$\psi_{u1} = \psi_i = 0,502 \text{ рад.}$$

Сдвиг фаз между напряжением $u_2(t)$ на элементах R_2 и C согласно (4.7) равен

$$\varphi_2 = \psi_{u2} - \psi_i = -\arctg(\omega CR) = -0,899 \text{ рад,}$$

тогда для начальной фазы ψ_{u2} получим

$$\psi_{u2} = \psi_i + \varphi_2 = 0,502 - 0,899 = -0,397 \text{ рад.}$$

Начальная фаза ψ_{i2} тока $i_2(t)$ в сопротивлении R_2 рав-

на фазе напряжения $u_2(t)$ (табл. 4.1), $\psi_{i_2} = \psi_{u_2} = -0,397$ рад, а фаза ψ_{i_C} тока емкости $i_C(t)$ больше фазы напряжения на емкости на $\pi/2$ (табл. 4.1), $\psi_{i_C} = \psi_{u_2} + \pi/2 = 1,174$ рад.

На рис. 4.11 приведены временные диаграммы мгновенных значений напряжений, а на рис. 4.12 – токов в цепи на рис. 4.10.

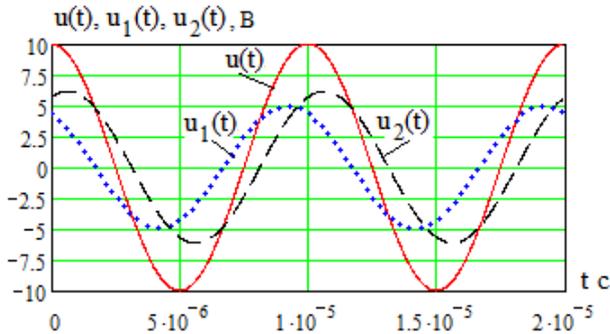


Рис. 4.11

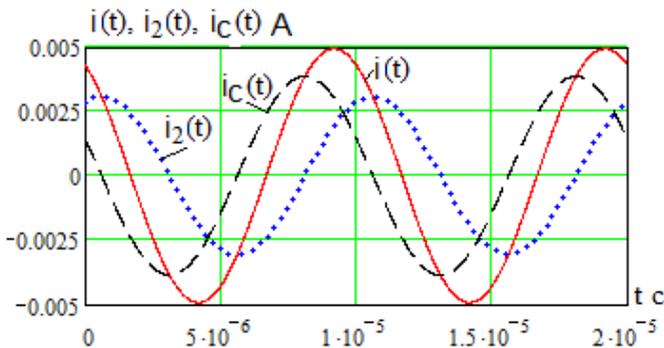


Рис. 4.12

Запишите самостоятельно выражения для мгновенных значений токов и напряжений. Убедитесь, что первый и второй законы Кирхгофа **применимы для мгновенных значений токов и напряжений**.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

5.1. Измерение постоянного тока

Измеритель тока (амперметр, миллиамперметр, микроамперметр) включается в разрыв цепи последовательно между источником и нагрузкой (рис. 5.1а). Амперметры можно разделить на две группы – измерители **постоянного** и **переменного** тока.

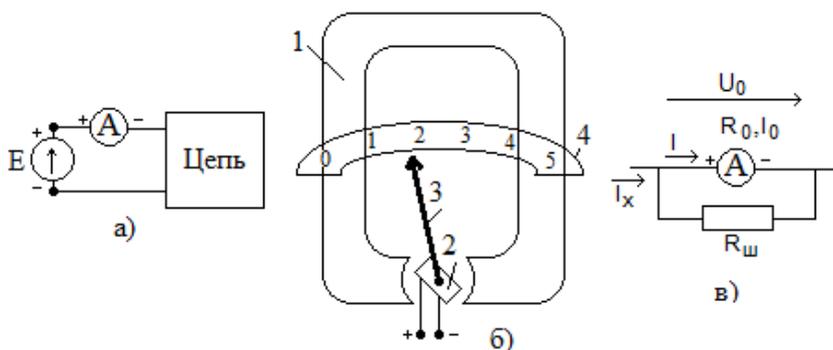


Рис. 5.1

Наиболее просты **электромагнитные** амперметры, в которых протекающий ток вызывает поворот стрелки измерителя, которая на выбранной шкале показывает значение протекающего тока.

Примером может служить магнитоэлектрический измеритель **постоянного тока**, показанный на рис. 5.1б. Он состоит из постоянного магнита 1 и закрепленной на вращающейся оси многовитковой рамки (катушки) 2 из тонкого медного провода. Измеряемый ток протекает через рамку и создает магнитное поле, которое взаимодействует с полем постоянного магнита и возникающий вращающий момент поворачивает стрелку 3. Прикрепленная к стрелке сжимающаяся спиральная пружина

создает противодействующий повороту стрелки момент, который останавливает ее в определенном месте шкалы 4, которая градуируется в значениях измеряемого постоянного тока. Параметрами измерителя являются сопротивление рамки R_0 и ток I_0 полного отклонения стрелки индикатора (максимальный измеряемый ток).

Величина I_0 может быть различной, часто она составляет 50 мкА, 100 мкА или 200 мкА, то есть прибор является микроамперметром постоянного тока.

Для расширения диапазона измеряемых токов параллельно микроамперметру с параметрами I_0 , R_0 включают шунтирующее сопротивление R_{III} (шунт), как показано на рис. 5.1в. Измеряемый ток I_x протекает через параллельное соединение сопротивлений R_0 и R_{III} , тогда по закону Ома напряжение U_0 на этом соединении равно

$$U_0 = I_x \frac{R_0 R_{III}}{R_0 + R_{III}}. \quad (5.1)$$

Протекающий через измеритель ток I равен

$$I = \frac{U_0}{R_0} = I_x \frac{R_{III}}{R_0 + R_{III}}, \quad (5.2)$$

тогда

$$I_x = I \frac{R_0 + R_{III}}{R_{III}} = I \left(1 + \frac{R_0}{R_{III}} \right). \quad (5.3)$$

Параллельное соединение сопротивлений R_0 и R_{III} выполняет функцию делителя измеряемого тока (рис. 2.1б). Максимальный измеряемый ток $I_{x \text{ MAX}}$ приведет к полному отклонению стрелки измерителя, через который будет протекать ток I_0 , тогда из (5.3)

$$I_{x \text{ MAX}} = I_0 \left(1 + \frac{R_0}{R_{III}} \right). \quad (5.4)$$

Зная максимальный ток измерителя I_0 , его сопротивление R_0 и требуемый максимальный измеряемый ток $I_{X\text{MAX}}$, из (5.4) можно определить необходимое сопротивление шунта $R_{Ш}$

$$R_{Ш} = R_0 \frac{I_0}{I_{X\text{MAX}} - I_0}. \quad (5.5)$$

Например, если $I_0 = 100$ мкА, $R_0 = 100$ Ом и $I_{X\text{MAX}} = 10$ мА, то

$$R_{Ш} = 100 \frac{10^{-4}}{10^{-2} - 10^{-4}} = 1,01 \text{ Ом.}$$

При условии $I_{X\text{MAX}} \gg I_0$ из (5.5) получим

$$R_{Ш} = R_0 \frac{I_0}{I_{X\text{MAX}}}, \quad (5.6)$$

а в рассматриваемом примере

$$R_{Ш} = 100 \frac{10^{-4}}{10^{-2}} = 1 \text{ Ом.}$$

Включение в цепь амперметра (рис.5.1а) влияет на протекающий ток, равный

$$I = \frac{E}{R_A + R_{Ц}}, \quad (5.7)$$

где R_A и $R_{Ц}$ - сопротивления амперметра и цепи,

$$R_A = \frac{R_0 R_{Ш}}{R_0 + R_{Ш}}. \quad (5.8)$$

Для ослабления этого влияния необходимо выполнение условия

$$R_A \ll R_{Ц}, \quad (5.9)$$

то есть **сопротивление амперметра должно быть значительно меньше сопротивления цепи.**

5.2. Измерение переменного тока

Простые амперметры переменного тока строятся на базе диодного выпрямителя и измерителя **средневыпрямленного значения** (среднего значения модуля) тока с помощью амперметра постоянного тока, которое пропорционально **действующему значению** измеряемого тока. Коэффициент пропорциональности зависит от типа выпрямителя и формы измеряемого тока.

На рис. 5.2а приведена временная диаграмма измеряемого тока $i(t)$, на рис. 5.2б – упрощенная вольт-амперная характеристика $i(u)$ полупроводникового диода, на рис. 5.2в – схема амперметра переменного тока с однополупериодным выпрямителем, а на рис. 5.2г и рис. 5.2д – показаны временные диаграммы токов диодов.

Измеряемый ток с единичной амплитудой разделяется диодами D1 и D2 на два однополярных тока $i_1(t)$ и $i_2(t)$, первый из которых протекает через амперметр постоянного тока и его **среднее** значение, равное 0,318 от амплитуды или 0,45 от действующего значения, отклоняет стрелку измерителя.

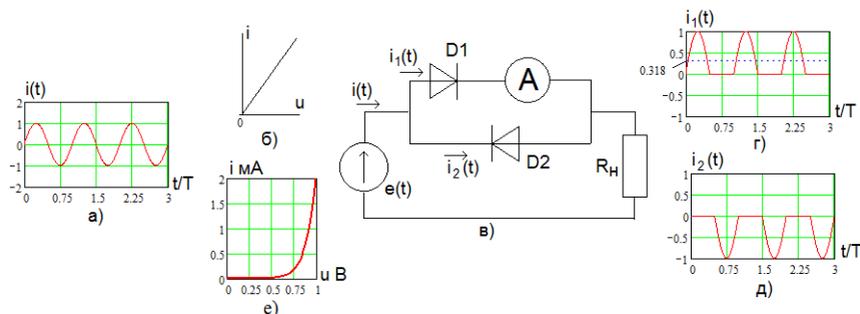


Рис. 5.2

Шкала амперметра градуируется в **действующих значениях гармонического тока**. При негармоническом токе показания прибора будут **ошибочными**.

Вольтамперная характеристика полупроводникового диода нелинейна, ее пример показан на рис. 5.2е, что приводит к нелинейности шкалы амперметра переменного тока. При измерении малых токов возникают дополнительные проблемы.

Для непосредственного измерения **действующих значений больших** токов используют термоэлектрические амперметры, работа которых основана на нагреве и соответствующей механической деформации термочувствительного элемента (высокоомной проволоки, биметаллической пары), которая преобразуется в поворот стрелки индикатора.

5.3. Измерение постоянного напряжения

Измеритель напряжения (**вольтметр V**) подключается **параллельно** цепи, как показано на рис. 5.3а и должен иметь **высокое внутреннее сопротивление**.

Простейший вольтметр реализуется на базе микроамперметра (с максимальным током I_0 и внутренним сопротивлением R_0) и добавочного резистора R_d , как показано на рис. 5.3б.

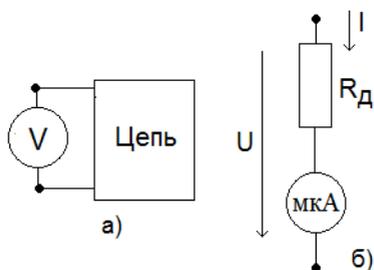


Рис. 5.3

Измеряемое постоянное напряжение U вызывает ток I , тогда на основе закона Ома

$$U = I(R_0 + R_d), \quad (5.10)$$

а шкалу микроамперметра можно проградуировать в значениях

напряжения.

Если необходимо обеспечить измерение напряжения с максимальным значением U_{MAX} , то из (5.10) можно определить необходимое добавочное сопротивление

$$R_D = \frac{U_{MAX}}{I_0} - R_0. \quad (5.11)$$

Например, при $U_{MAX} = 10$ В, $I_0 = 100$ мкА и $R_0 = 100$ Ом из (5.11) получим

$$R_D = \frac{10}{10^{-4}} - 100 \approx 100 \text{ кОм},$$

а при $U_{MAX} = 100$ В соответственно $R_D = 1$ МОм.

Переключая добавочные сопротивления, можно менять пределы измерения вольтметра.

5.4. Измерение переменного напряжения

Простейший вольтметр переменного напряжения реализуется на базе микроамперметра переменного тока с добавочным сопротивлением, как показано на рис. 5.4.

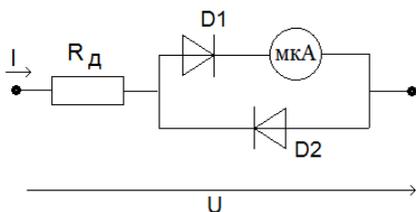


Рис. 5.4

При малом внутреннем сопротивлении микроамперметра амплитуды (или действующие значения) напряжения U и тока I связаны законом Ома

$$U = I \cdot R_D \quad (5.12)$$

и шкала амперметра градуируется в значениях напряжения.

5.5. Электронные измерители тока и напряжения

Рассмотренные простые амперметры и вольтметры, особенно переменного тока, обладают невысокими техническими характеристиками. Значительно лучшие свойства имеют электронные измерительные приборы на основе высококачественных усилителей постоянного и переменного тока.

На рис. 5.5 показана структурная схема электронного амперметра постоянного тока. Измеряемый ток I протекает через низкоомный резистор R_0 , создавая на нем напряжение $U_0 = I \cdot R_0$, которое подается на вход усилителя постоянного тока (УПТ) с высоким входным сопротивлением, а его выходной ток I_A , равный

$$I_A = K \cdot I \quad (5.13)$$

измеряется стрелочным амперметром, шкала которого градуируется в значениях измеряемого тока. Меняя коэффициент преобразования K , можно изменять пределы измерения тока.

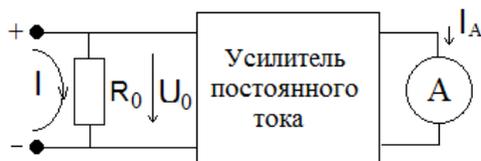


Рис. 5.5

На рис. 5.6 представлена структурная схема электронного вольтметра постоянного напряжения. Измеряемое напряжение U_X подается на вход усилителя постоянного напряжения с высоким входным сопротивлением $R_{вх}$. Выходной ток усилителя I_A , равный

$$I_A = G \cdot U_X, \quad (5.14)$$

протекает через амперметр, шкала которого градуируется в значениях измеряемого напряжения U_X . Параметр G с размерностью проводимости задает пределы измерения.

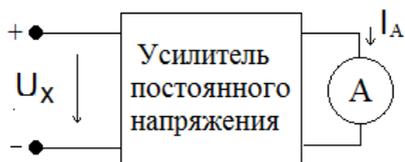


Рис. 5.6

Электронные измерители переменных токов и напряжений реализуются на базе диодных выпрямителей или прецизионных выпрямителей на операционных усилителях с последующим усилением их отклика. Пример структурной схема электронного амперметра переменного тока показан на рис. 5.8. Аналогично реализуется и вольтметр переменного напряжения.



Рис. 5.7

Шкалы измерителей переменных токов и напряжений градуируются в действующих значениях гармонических сигналов.

5.6. Цифровые измерители тока и напряжения

Простейшие цифровые амперметры и вольтметры реализуются на базе рассмотренных аналоговых измерителей, в которых в качестве отсчетного устройства вместо стрелочного амперметра используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и многоразрядный цифровой индикатор. Пример универсального прибора (мультиметра) показан на рис. 5.8.

При измерении гармонических токов и напряжений рассматриваемые цифровые приборы показывают их **действующие значения**. Для негармонических сигналов **известной**

формы показания этих измерителей необходимо пересчитывать.



Рис. 5.8

Известны цифровые измерители действующих значений сигналов произвольной формы.

5.7. Работа электронного осциллографа

Электронный осциллограф позволяет визуализировать временные диаграммы напряжений и измерять их параметры на экране по осям времени и уровня.

Основой прибора является электронно-лучевая трубка в виде удлиненной стеклянной вакуумированной колбы, показанной на рис. 5.9а.

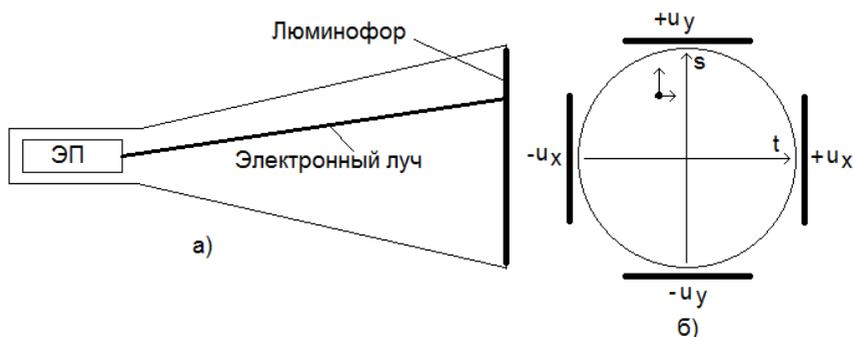


Рис. 5.9

На внутреннем торце колбы нанесен слой люминофора, который начинает испускать свет (зеленый или синий) при попадании на него потока электронов (электронного луча), который формируется электронной пушкой (ЭП), показанной на рис. 5.9а.

Движение луча с **постоянной скоростью** по горизонтали (оси x или t на рис. 5.9б) вызывается линейно растущим (пилообразным) напряжением развертки $\pm u_x$, подаваемым на пластины горизонтального отклонения, форма этого **напряжения развертки** показана на рис. 5.10а.

Входной сигнал осциллографа $s(t)$ подается на пластины вертикального отклонения луча $\pm u_y$. Пример входного гармонического сигнала показан на рис. 5.10б.

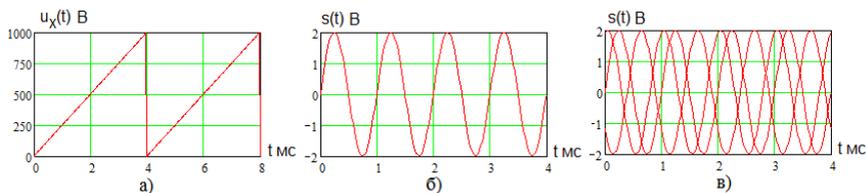


Рис. 5.10

Совместным повторяющимся движением луча по горизонтали и вертикали на экране (на слое люминофора) формируется светящееся изображение временной диаграммы входного сигнала (рис. 5.10б). На экране изображена сетка, по делениям которой производятся измерения временных интервалов (на рис. 5.10б шаг сетки по оси времени (по горизонтали) 1 мс/деление, тогда период сигнала равен одно деление сетки или 1 мс). Входной сигнал $s(t)$ отклоняет луч по вертикали и сетка позволяет измерять его уровень (в примере на рис. 5.10б шаг сетки равен 1 В/деление, тогда размах сигнала равен 4 В, а амплитуда соответственно 2 В).

Изображение на экране будет устойчивым, если период напряжения развертки (в примере на рис. 5.10а он равен 4 мс) будет в **целое число** раз больше периода сигнала (в примере на рис. 5.10б период равен 2 мс). В этом случае в каждом следующем периоде развертки луч будет «пробегать» по тем же точкам экрана, что и на предыдущем. Такой режим работы генератора напряжения развертки (рис. 5.10а) называют **синхронным**.

При нарушении синхронизма генератора развертки с входным сигналом изображение на экране будет неустойчивым, как показано на рис. 5.10в.

Упрощенная структурная схема осциллографа показана на рис. 5.11.

Входное напряжение подается в канал вертикального отклонения луча (который усиливает его до нескольких сотен вольт), а выходное напряжение подается на пластины вертикального отклонения луча.

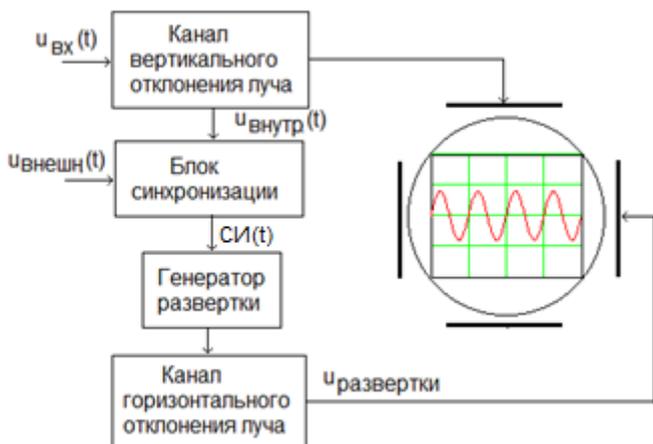


Рис. 5.11

Пилообразное напряжение развертки вида рис. 5.10а от генератора поступает в канал горизонтального отклонения луча (усилитель) и далее на пластины горизонтального отклонения трубки.

Блок синхронизации формирует синхроимпульсы СИ(t) (рис. 5.11), по фронту которых запускается генератор развертки, как показано на рис. 5.12а. Синхроимпульсы вырабатываются либо от входного сигнала из канала вертикального отклонения луча в виде напряжения $u_{\text{внутр}}(t)$ (**в режиме внутренней синхронизации**), либо от внешнего сигнала $u_{\text{внешн}}(t)$, который должен формироваться пользователем вне осциллографа (**в режиме внешней синхронизации**).

Развертка осциллографа может быть **непрерывной** (рис. 5.12а) и **ждущей** (рис. 5.12б). В режиме непрерывной развертки генератор формирует пилообразные импульсы, даже если отсутствуют синхроимпульсы СИ(t) (в этом случае отсутствует синхронизм развертки с входным сигналом). В режиме ждущей развертки по фронту каждого СИ формируется один пилообразный импульс (рис. 5.12б), а затем генератор развертки ожидает следующего синхроимпульса.

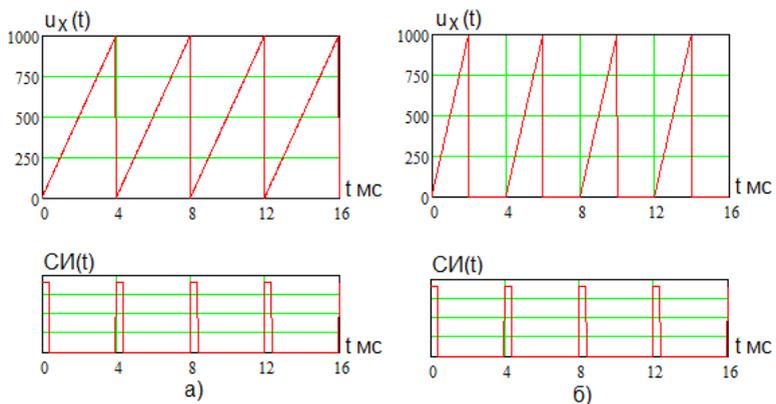


Рис. 5.12

Выполнение измерений с помощью осциллографа С1-55 описано в разделе 11.

6. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ

Измерение сопротивления резистора осуществляется **омметром**. В простейшем случае он реализуется с помощью амперметра и источника известного постоянного напряжения, как показано на рис. 6.1а.

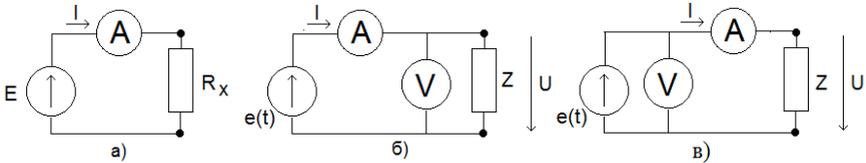


Рис. 6.1

По закону Ома неизвестное сопротивление R_x равно отношению известной ЭДС источника напряжения E , например, $E = 1$ В, к измеренному току I

$$R_x = \frac{E}{I}. \quad (6.1)$$

Шкала амперметра градуируется в значениях сопротивления. Согласно (6.1) шкала является обратной – малому току соответствует большое сопротивление.

Универсальным методом измерения параметров элементов является **метод вольтметра-амперметра**. Его структурная схема показана на рис. 6.1б или рис. 6.1в. На элемент с неизвестными параметрами подается гармоническое напряжение $e(t) = E \cdot \cos(2\pi ft)$ с амплитудой E и частотой f . В цепи измеряются действующие значения переменного тока I и напряжения U , тогда по закону Ома модуль сопротивления элемента Z равен

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (6.2)$$

Если элементом является резистор, то его сопротивление определяется выражением

$$R = \frac{U}{I}, \quad (6.3)$$

если индуктивность, то ее величина равна

$$L = \frac{U}{2\pi f I}, \quad (6.4)$$

а если емкость, то

$$C = \frac{I}{2\pi f U}. \quad (6.5)$$

Используются и другие методы измерения параметров элементов.

7. УСИЛИТЕЛИ СИГНАЛОВ

7.1. Задача усиления сигнала

Усилитель электрических сигналов – это электронное устройство четырьмя полюсами (точками подключения, выводами) - **четырёхполюсник**, как показано на рис. 7.1. На два входных полюса подается входной сигнал $u_{ВХ}(t)$ или $i_{ВХ}(t)$, а к двум выходным полюсам подключено сопротивление нагрузки Z_H , с которого снимается выходной сигнал $u_{ВЫХ}(t)$ или $i_{ВЫХ}(t)$, по форме совпадающий с входным сигналом, но имеющий более **высокий уровень**.

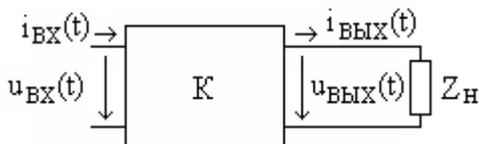


Рис. 7.1

Для **идеального усилителя** имеет место равенство

$$s_{ВЫХ}(t) = K \cdot s_{ВХ}(t - \Delta t), \quad (7.1)$$

$s_{ВХ}(t)$ - входной сигнал, $s_{ВЫХ}(t)$ - выходной сигнал (напряжение, ток или мощность), а K - **коэффициент усиления** (по напряжению, току или мощности), Δt - время задержки сигнала. Идеальный усилитель – это линейное электронное устройство. Он практически **не реализуем**, к его свойствам можно лишь приблизиться с определенной точностью.

Реальный усилитель – нелинейное устройство, свойства которого зависят от уровня, формы и частоты входного сигнала. Часто его приближенно рассматривают как линейный четырёхполюсник.

Усилители электрических сигналов классифицируются по различным признакам. По виду сигналов различают усилители напряжения, тока и мощности, по рабочим частотам –

усилители низких (УНЧ), высоких (УВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот, по полосе усиливаемых частот – узкополосные и широкополосные усилители. По назначению усилители делятся, например, на:

- усилители постоянного тока (УПТ);
- предварительные усилители;
- оконечные усилители;
- дифференциальные усилители и т.д.

По выходной мощности усилители разделяют на мало-мощные (например, до 0,3 Вт), средней мощности (от 0,3 Вт до 3 Вт) и высокой мощности (выше 3 Вт).

Усилители классифицируются по принципиальной схеме: усилитель с резистивно-емкостными связями, эмиттерный повторитель, схема Дарлингтона и др.

7.2. Коэффициент усиления

Характеристики усилителя оцениваются при входном гармоническом сигнале с круговой частотой $\omega = 2\pi f$. Модуль коэффициента усиления по напряжению равен

$$K_u(\omega) = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}, \quad (7.2)$$

где $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ - амплитуды (или действующие значения) входного и выходного напряжений усилителя на рис. 7.1. Аналогично определяется **модуль коэффициента усиления по току**

$$K_i(\omega) = \frac{I_{ВЫХ}}{I_{ВХ}}, \quad (7.3)$$

где $I_{ВХ}$ и $I_{ВЫХ}$ - амплитуды (или действующие значения) входного и выходного токов усилителя.

Коэффициент усиления по мощности - величина действительная и положительная, равная отношению мощности $P_{ВХ}$, потребляемой входной цепью усилителя от источника сигнала, к выходной мощности $P_{ВЫХ}$, отдаваемой усилителем в

нагрузку

$$K_p(\omega) = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}}. \quad (7.4)$$

7.3. Частотные характеристики

Зависимость коэффициента усиления $K_u(\omega)$, $K_i(\omega)$ или $K_u(f)$, $K_i(f)$ ($\omega = 2\pi f$) называют **амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)** усилителя, их пример показан на рис. 7.2а.

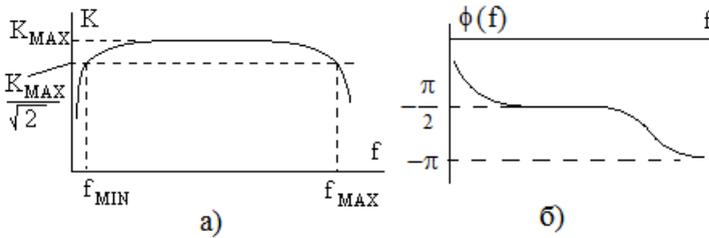


Рис. 7.2

Коэффициент усиления может измеряться в децибелах (дБ) в соответствии с формулой

$$K_{дБ} = 20 \cdot \lg(K). \quad (7.5)$$

Например, если $K = 100$, то $K_{дБ} = 20$ дБ, если $K = 0,01$, то $K_{дБ} = -20$ дБ. Удобно, что при $K = 1$ получим $K_{дБ} = 0$ дБ, то есть положительные значения АЧХ в децибелах указывают на усиление, а отрицательные – на ослабление сигнала. Коэффициент усиления по мощности в децибелах определяется равенством

$$K_{P\ дБ} = 10 \cdot \lg(K_p), \quad (7.6)$$

так как мощность пропорциональна квадрату тока или напряжения.

Фазочастотной характеристикой (ФЧХ) называют зависимость от частоты разности фаз между выходным и вход-

НЫМ СИГНАЛАМИ,

$$\varphi(\omega) = \psi_{\text{ВЫХ}} - \psi_{\text{ВХ}}, \quad (7.7)$$

измеряется в радианах или градусах, ее пример показан на рис. 7.26.

Форма частотных характеристик определяется схемой и параметрами элементов усилителя.

Важнейшей характеристикой усилителя является **полоса Π усиливаемых частот**, она определяется как частотный интервал, внутри которого коэффициент усиления падает не более, чем в $\sqrt{2}$ раз (на 3 дБ) по сравнению со значением на заданной номинальной частоте (для УНЧ она равна 1 кГц) или относительно максимального значения АЧХ,

$$\Pi = f_{\text{МАХ}} - f_{\text{МИН}}, \quad (7.8)$$

$f_{\text{МАХ}}$ и $f_{\text{МИН}}$ - верхняя и нижняя граничные частоты (рис. 7.2а). В (7.8) частоты измеряются в Гц, как принято при проектировании и экспериментальных исследованиях усилителя, аналогично определяется полоса в рад/с.

Усилитель должен иметь высокое входное и низкое выходное сопротивление.

7.4. Усилитель с резистивно-емкостными связями

Принципиальная схема усилителя с резистивно-емкостными связями показана на рис. 7.3.

Это усилитель с **резистивной** коллекторной нагрузкой R_K , связь усилителя с входной и выходной цепями осуществляется через разделительные конденсаторы C_{P1} и C_{P2} . Его основой является биполярный транзистор $VT1$ типа п-р-п, включенный по схеме с **общим эмиттером** и питающийся от источника положительного постоянного напряжения с ЭДС E .

Тип транзистора выбирается исходя из его частотных свойств, мощности и стоимости. Для самостоятельных экспериментальных работ целесообразно выбрать дешевый отечественный высокочастотный маломощный транзистор КТ315А.

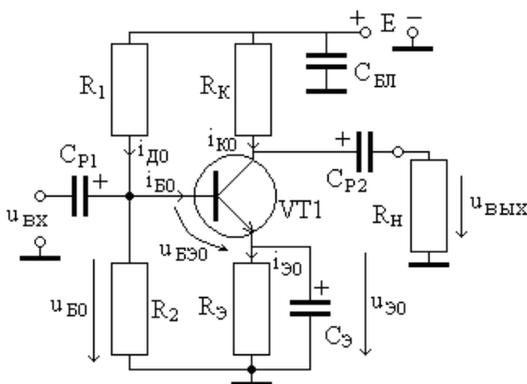


Рис. 7.3

Расчет элементов и характеристик усилителя проведен в [3], результаты представлены в табл. 7.1 и табл. 7.2.

Таблица 7.1

Элемент	R_1 кОм	R_2 кОм	R_K Ом	$R_Э$ Ом	$C_Э$ мкФ	C_{P1} мкФ	C_{P2} мкФ
Значение	6,8	3,9	820	820	220	1200	330

Таблица 7.2

Характеристика	Величина
Коэффициент усиления по току	-25
Коэффициент усиления по напряжению	-55
Входное сопротивление, Ом	150
Выходное сопротивление, кОм	68

Частотные характеристики усилителя показаны на рис. 7.2. Пример временных диаграмм напряжений на входе (u_{BX}) с амплитудой 10 мВ и выходе ($u_{ВЫХ}$) усилителя, полученных методом схемотехнического моделирования, показан на рис. 7.4.

Как видно, цепь на рис. 7.2 усиливает сигнал, хотя коэффициент усиления по напряжению меньше расчетного. Уси-

Литература имеет низкое входное сопротивление и высокое выходное, что неблагоприятно для его применения.

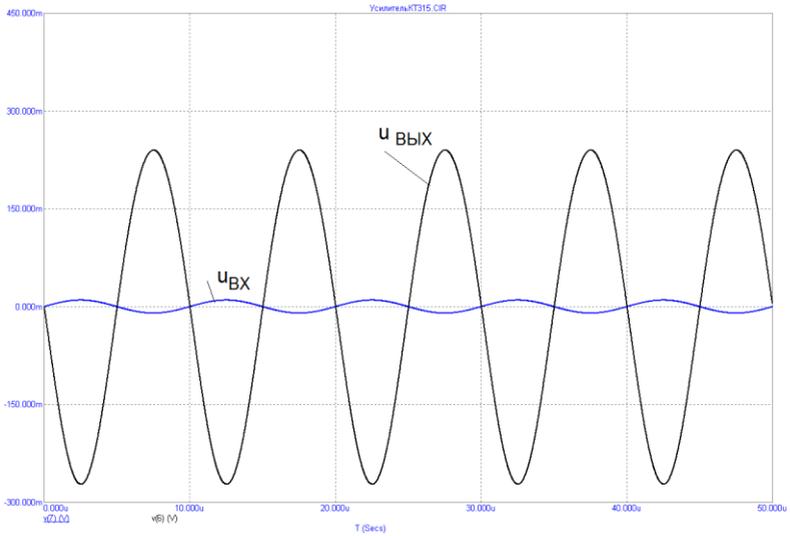


Рис. 7.4

8. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

8.1. Операционный усилитель

Операционный усилитель (ОУ), условно-графическое изображение которого показано на рис. 8.1, выполняет **операцию** вида

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = K[u_2(t) - u_1(t)], \quad (8.1)$$

$u_{\text{ВЫХ}}(t)$ - выходное напряжение ОУ, $u_1(t)$ - напряжение на его **инвертирующем**, $u_2(t)$ - на **не инвертирующем** входах, K - коэффициент усиления, E - напряжение питания (обычно от $\pm 3\text{В}$ до $\pm 30\text{В}$).

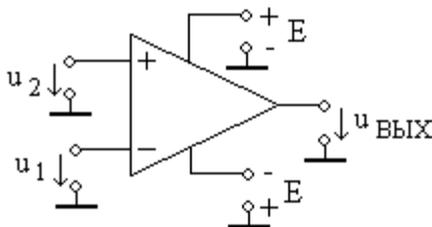


Рис. 8.1

Операционные усилители характеризуются высоким (для **идеального ОУ** - **бесконечным**) коэффициентом усиления K , **высоким** входным и **низким** выходным сопротивлениями. Они обладают высокой **универсальностью применения** в различных устройствах обработки сигналов благодаря наличию двух входов и возможности использовать различные варианты обратных связей.

Обратная связь в усилителе заключается в подаче части выходного сигнала на вход усилителя, где она складывается с входным сигналом.

Для самостоятельных экспериментальных работ целесо-

образно использовать отечественную интегральную схему ОУ КР544УД2А, схема включения которой показана на рис. 8.2а, а внешний вид корпуса – на рис. 8.2б. Напряжение питания выбирается в пределах от 8 В до 16,5 В, низкочастотный коэффициент усиления составляет не менее 96 дБ (более 10^5), усилитель имеет очень малый входной ток 10 нА и огромное входное сопротивление более 100 МОм, полоса усиливаемых частот составляет 15 МГц. Полное техническое описание приведено в прил. 2.

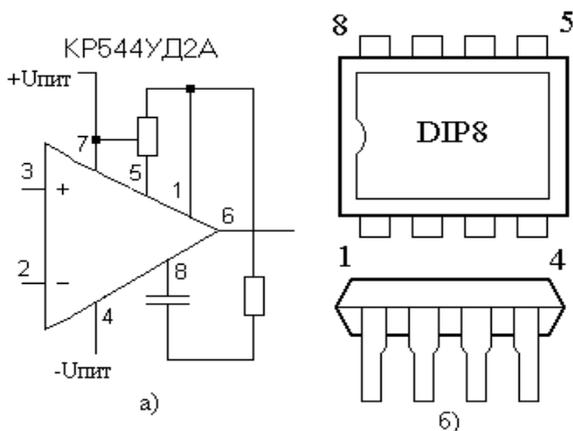


Рис. 8.2

Промышленность выпускает интегральные схемы, в составе которых имеются два или четыре ОУ в корпусе, например, микросхема К157УД2, ее схема включения показана на рис. 8.3а, а на рис. 8.3б приведен ее внешний вид. Оба ОУ имеют общее напряжение питания от 3 В до 18 В, коэффициент усиления на низких частотах не менее 82 дБ, входной ток не более 500 нА, а входное сопротивление более 40 МОм, он имеет сравнительно низкую полосу усиливаемых частот до 1 МГц. Емкости для ОУ на рис. 8.2а и рис. 8.3а равны 33-47 пФ.

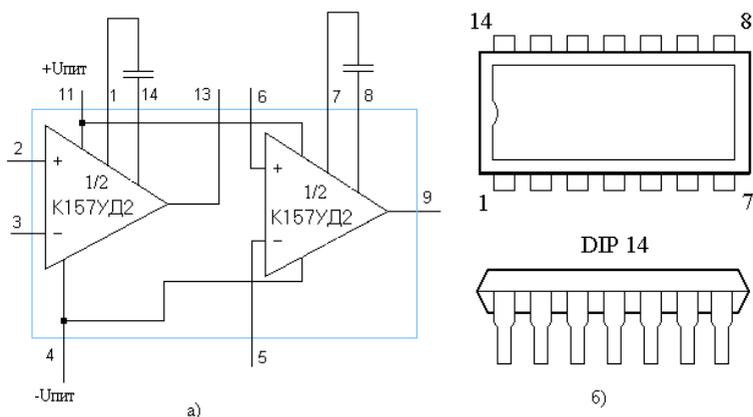


Рис. 8.3

Очень высокое входное сопротивление усилителя (сотни кОм и выше) можно реализовать только на низких частотах. С ростом частоты входное сопротивление усилителя уменьшается из-за шунтирующего действия паразитной входной емкости ОУ (единицы – десятки пФ). Снижение входного сопротивления наблюдается уже на частотах выше 1 кГц. На высоких частотах используют специальную схемотехнику с входными сопротивлениями и нагрузками, равными 75 Ом или 50 Ом.

В ходе простых расчетов электронных устройств на базе ОУ обычно используют его **идеальную модель**: с бесконечным коэффициентом усиления и входным сопротивлением, и при нулевом выходном сопротивлении.

8.2. Усилители сигналов на базе ОУ

Простейшие усилители на базе ОУ строятся на основе его **не инвертирующего** (рис. 8.4а) и **инвертирующего** (рис. 8.4б) включения (напряжения питания интегральных схем в типовом включении на принципиальных и эквивалентных схемах электронных устройств не обычно показываются).

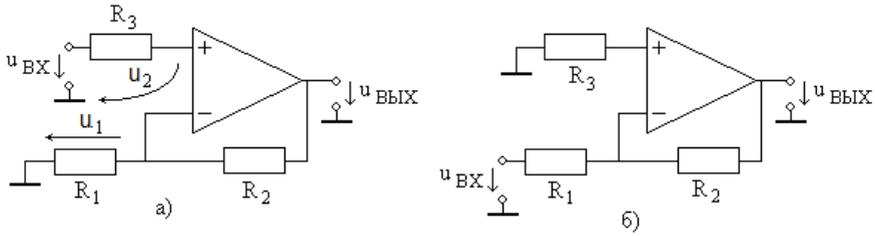


Рис. 8.4

Резисторы R_1 и R_2 (цепь **отрицательной обратной связи**) обеспечивают передачу на инвертирующий (отрицательный) вход усилителя части выходного сигнала, образуя **резистивный делитель напряжения** с коэффициентом передачи $R_1/(R_1 + R_2)$.

Найдем коэффициент усиления не инвертирующего каскада на идеальном ОУ (рис. 8.4а). При конечном выходном напряжении и бесконечном коэффициенте усиления идеального ОУ согласно (8.1) разность напряжений

$$u_2 - u_1 = 0. \quad (8.2)$$

При бесконечном входном сопротивлении ОУ напряжение u_1 делителя напряжения R_1, R_2 равно

$$u_1 = u_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (8.3)$$

а при нулевом токе через резистор R_3

$$u_2 = u_{ВХ}, \quad (8.4)$$

тогда с учетом (8.2) получим

$$u_{ВХ} = u_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (8.5)$$

В результате из (8.5) коэффициент усиления каскада на рис. 8.4а равен

$$K_y = \frac{u_{ВЫХ}}{u_{ВХ}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (8.6)$$

При $R_2 = 0$ (все выходное напряжение подается на ин-

вертирующий вход ОУ, обеспечивая 100% отрицательную обратную связь) из (8.6) получим $K_y = 1$. Полученный усилитель называют **повторителем напряжения**.

Для инвертирующего усилителя на рис. 8.4б аналогично предыдущему получим (проведите расчет самостоятельно)

$$K_y = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (8.7)$$

Входное сопротивление не инвертирующего усилителя на базе ОУ (рис. 8.4а) равно

$$R_{BX} \approx \left(1 + \frac{K}{K_y}\right) R_{BX\ OY}, \quad (8.8)$$

$R_{BX\ OY}$ входное сопротивление не инвертирующего входа самого ОУ (в идеальном ОУ оно бесконечно), K - собственный коэффициент усиления ОУ, K_y - требуемый коэффициент усиления. Как видно, при $K \gg K_y$ из (8.8) получим неравенство $R_{BX} \gg R_{BX\ OY}$, то есть не инвертирующий усилитель на базе ОУ на низких частотах имеет **огромное входное сопротивление**.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя на базе ОУ приближенно равно

$$R_{BX} \approx R_1. \quad (8.9)$$

Для расчета усилителей на рис. 8.4 задается коэффициент усиления и сопротивления $R_1 = R_3$. На низких частотах обычно выбирают величину $R_1 = 10 \div 100$ кОм, затем из (8.2) или (8.3) находят R_2 . Если при выбранном R_1 получается $R_2 > 1 \div 10$ МОм, то уменьшают R_1 .

Пусть задан коэффициент усиления $K_y = 10$. Для реализации усилителя выберем ОУ 157УД2 и $R_1 = R_3 = 10$ кОм, при этом для не инвертирующего усилителя (рис. 8.4а) из (8.6) получим

$$R_2 = (K_y - 1)R_1 = 90 \text{ кОм}.$$

Если необходим инвертирующий усилитель, то из (8.7) получим

$$R_2 = K_v R_1 = 100 \text{кОм}.$$

Модели усилителей на ОУ в программе MicroCAP показаны на рис. 8.5.

На рис. 8.6 показана полученная в результате моделирования АЧХ неинвертирующего усилителя (рис. 8.5а), а на рис. 8.7 - инвертирующего усилителя (рис. 8.5б).

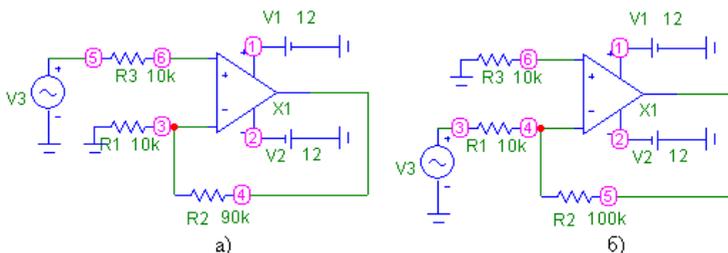


Рис. 8.5

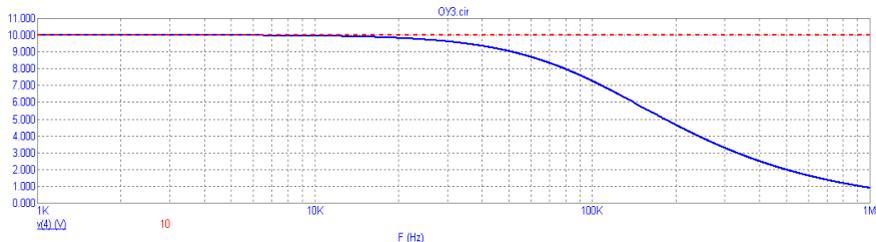


Рис. 8.6

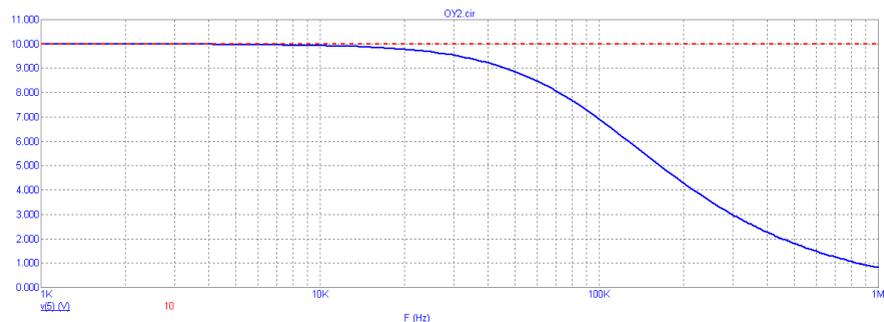


Рис. 8.7

Рассмотренные усилители обеспечивают требуемый коэффициент усиления на рабочих частотах до нескольких десятков кГц, что определяется свойствами ОУ. Согласно (8.6) и (8.7) коэффициент усиления определяется сопротивлениями резисторов в цепи обратной связи ОУ, что при использовании резисторов с высокой точностью позволяет изготавливать усилители с требуемым коэффициентом усиления, например, для использования в измерительных приборах.

На базе ОУ реализуются различные устройства обработки сигналов (сумматоры, вычитатели, интеграторы, дифференциаторы и др.).

8.3. Прецизионный выпрямитель

Одним из устройств на базе ОУ является прецизионный выпрямитель, схема которого показана на рис. 8.8.

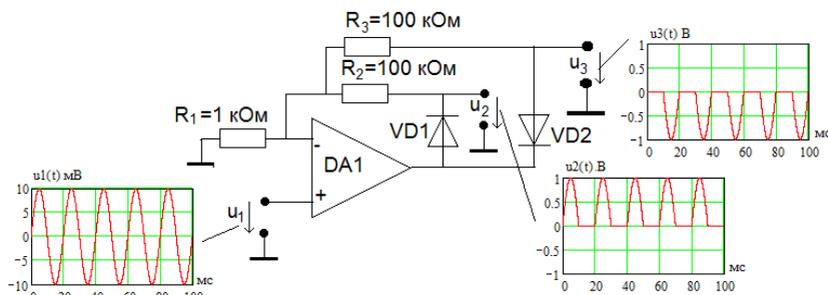


Рис. 8.8

Входное напряжение $u_1(t)$ с амплитудой 10 мВ подается на не инвертирующий вход ОУ (его временная диаграмма показана в левой части рис. 8.8), а временные диаграммы выходных сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ – в его правой части. Как видно, устройство обеспечивает практически идеальное выпрямление входного напряжения и усиление сигнала с коэффициентом 100. Подобные выпрямители целесообразно использовать в вольтметрах переменного напряжения.

9. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

9.1. Структурная схема источника питания

Для функционирования электронных устройств требуется источник питания (обычно постоянного напряжения). Для переносной и мобильной аппаратуры необходимы автономные источники (батареи, аккумуляторы), однако получаемая от них электроэнергия имеет высокую стоимость. Значительно дешевле электроэнергия, получаемая от силовой сети переменного (гармонического) тока с частотой 50 Гц и действующим значением напряжения 220В. В **розетке** однофазной силовой сети (дома, в лаборатории) имеется два контакта (рис. 9.1а), к которым подключается **вилка** источника питания. Один из контактов с высоким напряжением относительно точки нулевого потенциала («земли») называют **фазой**, а второй (с теоретически с нулевым потенциалом) **нейтралью**.

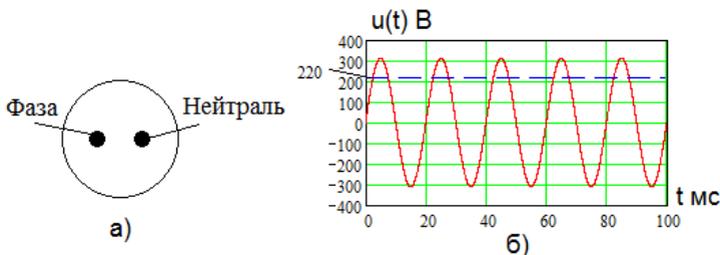


Рис. 9.1

Временная диаграмма сетевого напряжения $u(t)$ показана на рис. 9.1б. Его амплитуда равна $U_m = 220\sqrt{2} = 311\text{В}$, а период повторения 20 мс, что соответствует частоте сети 50 Гц.

Источник (блок) питания от силовой электросети преобразует ее высокое напряжение в постоянное напряжение заданной величины с типичными значениями 5В, 9В, 12В или 24В. Структурная схема блока питания показана на рис. 9.2.

Переменное напряжение силовой сети (220В) подается

на **силовой трансформатор** (Тр), задачей которой является снижение его до требуемого уровня U_2 (например, 20В действующего значения).

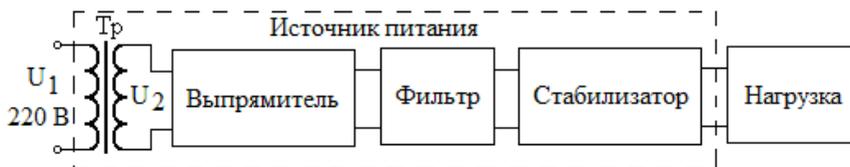


Рис. 9.2

Полученное переменное напряжение U_2 с вторичной обмотки трансформатора подается на **выпрямитель** на полупроводниковых диодах. Формируемые диодами **однополярные импульсы тока** поступают на **фильтр**, конденсатор которого заряжается импульсами тока и на нем выделяется **постоянная** составляющая напряжения выпрямителя. Это напряжение поступает на электронный **стабилизатор** напряжения (в простых блоках питания он может отсутствовать), задачей которого является поддержание заданного значения выходного постоянного напряжения при изменении напряжения сети и тока нагрузки. К выходу источника питания подключается нагрузка - питаемое электронное устройство.

9.2. Силовой трансформатор

Силовой трансформатор представляет собой сердечник из пластин трансформаторного железа, на котором расположены обмотки (катушки) из медного провода (рис. 9.3).

Силовая сеть подключена к первичной обмотке трансформатора с числом витков W_1 и создает на ней напряжение $U_1 = 220\text{В}$. В первичной обмотке возникает гармонический ток, создающей в ней переменное магнитное поле.

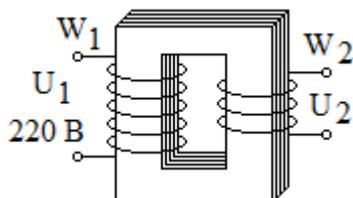


Рис. 9.3

Сердечник трансформатора замыкает внутри себя силовые линии магнитного поля и оно воздействует на вторичную обмотку с числом витков W_2 (вторичных обмоток может быть несколько с разным числом витков). Переменное магнитное поле создает во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции, за счет которой на вторичной обмотке создается переменное напряжение U_2 ,

$$U_2 = n \cdot U_1. \quad (9.1)$$

Величину n называют коэффициентом трансформации,

$$n = \frac{W_2}{W_1}. \quad (9.2)$$

Промышленность выпускает силовые трансформаторы типов ТПП (для питания полупроводниковых устройств) или ТН (трансформаторы накальные для электровакуумных приборов, например, электронных ламп).

Обычно первичная обмотка состоит из двух частей. Они должны включаться **последовательно и согласно**. При **встречном** включении этих обмоток **трансформатор выйдет из строя**. Вторичные обмотки также состоят из двух частей и соединяются аналогично. Внешний вид таких трансформаторов показан на рис. 9.4.

В качестве примера рассмотрим силовой трансформатор типа ТПП48 127/220 50, его условно-графическое изображение представлено на рис. 9.5. Он предназначен для работы в силовых сетях переменного тока с напряжением 127В или 220В с частотой 50 Гц, это указывается в его маркировке, и обеспечивает в нагрузках максимальную суммарную мощность 14 ВА.

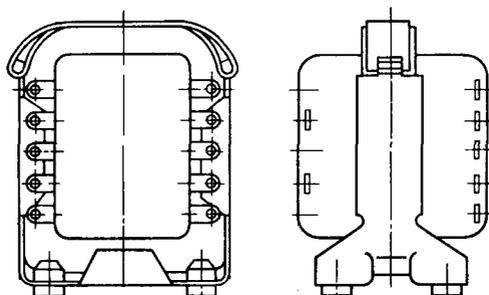


Рис. 9.4

Первичными являются две обмотки с выводами 1-5 и 6-10 на рис. 9.5 (их номера указаны на корпусе трансформатора). Сетевое напряжение (127В или 220В) подается на указанные в справочнике выводы. В силовой сети 220В соединяются выводы 2 и 6 (обеспечивая согласной включение обмоток), а напряжение 220 В подается на выводы 1 и 8.

Трансформатор имеет шесть вторичных обмоток для формирования различных напряжений (номера их выводов 11-12, 13-14, 15-16, 17-18, 19-20 и 21-22 указаны на корпусе). При отсутствии нагрузки на них формируются напряжения 13,8В, 13,8В, 13,8В, 13,8В, 1,5В и 1,5В соответственно. Максимальный тока каждой обмотки 0,61 А.

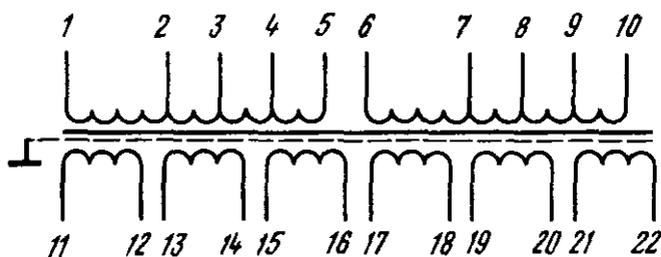


Рис. 9.5

9.3. Выпрямитель

В блоках питания используются две **однополупериодные** (рис. 9.6а) и **двухполупериодные** схемы выпрямителей.

Последние строятся на базе двух вторичных обмоток и двух диодов (рис. 9.6б) или одной обмотки и четырех диодов (**мостовой** выпрямитель [3]), VD – полупроводниковые диоды, R_H – сопротивление нагрузки.

Наиболее эффективен двухполупериодный выпрямитель на рис. 9.6б. Входное напряжение силовой сети $u_1 = 220\text{В}$ поступает на первичную обмотку силового трансформатора Тр. На вторичных обмотках создаются **противофазные** относительно «земли» напряжения u_{21} и u_{22} , которые подаются на выпрямитель из двух силовых диодов VD1 и VD2.

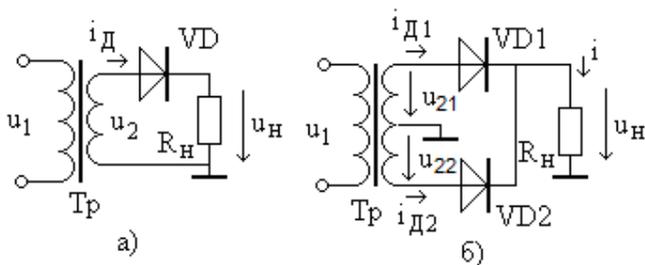


Рис. 9.6

В результате схемотехнического моделирования получены На рис. 9.7 показаны полученные с помощью схемотехнического моделирования получены диаграммы входного напряжения u_1 (верхняя кривая, амплитуда 311В и частота 50Гц), напряжений на вторичных обмотках u_{21} (сплошная линия) и u_{22} (пунктир) в центре и импульсов тока $i = i_{Д1} + i_{Д2}$ нагрузки R_H (нижняя кривая). При положительном напряжении u_{21} (помечено цифрой 1) диод VD1 открыт и через него в нагрузку поступает импульс тока $i_{Д1}$, а диод VD2 закрыт и ток через него отсутствует ($i_{Д2} = 0$). При отрицательном напряжении u_{21} диод VD2 открывается и в нагрузке появляется импульс тока $i_{Д2}$, при этом диод VD1 закрыт ($i_{Д1} = 0$).

9.4. Фильтр

В схемах на рис. 9.6 выходное напряжение имеет пульсирующий характер, повторяя форму импульсов тока (в нижней части рис. 9.7). Для питания электронной аппаратуры требуется **постоянное** напряжение, которое формируется **сглаживающим фильтром** источника питания.

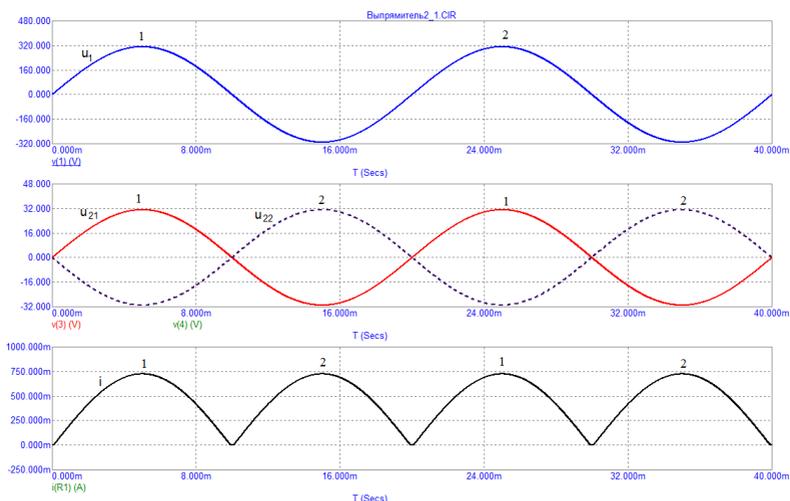


Рис. 9.7

В простейшем случае сглаживающий фильтр реализуется подключением конденсатора C_ϕ параллельно нагрузке, как показано на рис. 9.8. Импульсы тока выпрямителя заряжают C_ϕ , создавая на нем постоянное (слабо пульсирующее) напряжение U_0 , пригодное для питания электронных устройств. Чем больше емкость C_ϕ , тем меньше уровень пульсаций выходного напряжения U_0 .

Используются и другие схемы сглаживающего фильтра блока питания [3].

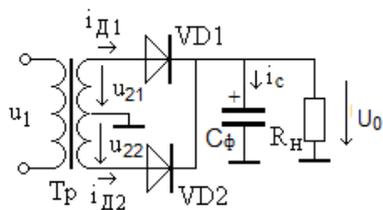


Рис. 9.8

Емкости фильтра C_ϕ зависит от выпрямленного (постоянного) напряжения U_0 и тока нагрузки I_H или сопротивления нагрузки

$$R_{HB} = \frac{U_0}{I_H}.$$

В двухполупериодном выпрямителе емкость фильтра выбирается из условия

$$C_\phi \gg \frac{1}{2\omega_C R_{HB}},$$

$\omega_C = 100\pi \text{ рад/с}$ - круговая частота напряжения силовой сети с циклической частотой 50Гц. Если задано выпрямленное напряжение $U_0 = 20\text{В}$ и ток нагрузки $I_H = 0,5\text{А}$ (при этом $R_{HB} = 40 \text{ Ом}$), то

$$C_\phi \gg \frac{1}{\omega_C R_{HB}} = \frac{1}{100\pi \cdot 40} = 80 \text{ мкФ}$$

и целесообразно выбрать $C_\phi = 1000 \text{ мкФ}$.

Зависимости от времени напряжения u_1 (действующее значение 220В), тока i_C емкости фильтра $C1$,

$$C1 = C_\phi = 1000 \text{ мкФ},$$

и напряжения U_0 на сопротивлении нагрузки 40 Ом приведены на рис. 9.9.

Рассмотренный выпрямитель по окончании переходного процесса формирует постоянное (слабо пульсирующее) напряжение 25 В, пригодное для питания электронных устройств.

9.5. Электронный стабилизатор напряжения

Если напряжения сети меняется во времени (нестабильно), то формируемое выпрямителем постоянное напряжение пропорционально изменяется и уменьшается при увеличении тока в нагрузке. При этом повышается амплитуда пульсаций с частотой 50 в однополупериодном выпрямителе или 100 Гц в двухполупериодном.

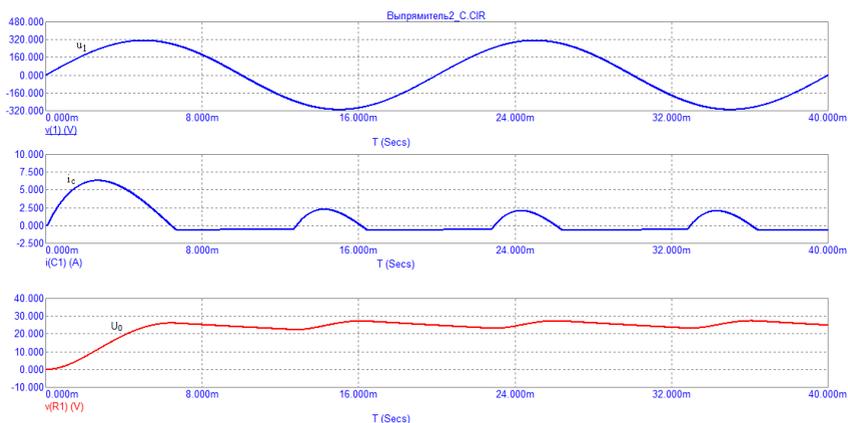


Рис. 9.9

Стабильность напряжения на нагрузке можно обеспечить, если между выпрямителем и нагрузкой включить электронный стабилизатор напряжения.

Самый простой стабилизатор напряжения строится на полупроводниковом стабилитроне, его схема изображена на рис. 9.10а, а вольтамперная характеристика стабилитрона – на рис. 9.10б (рассмотрите его работу самостоятельно).

Такие стабилизаторы часто являются источником опорного напряжения (ИОН) в более сложных и эффективных **компенсационных** (линейных) и **импульсных** электронных стабилизаторах постоянного напряжения или тока, примеры рассмотрены в [3].

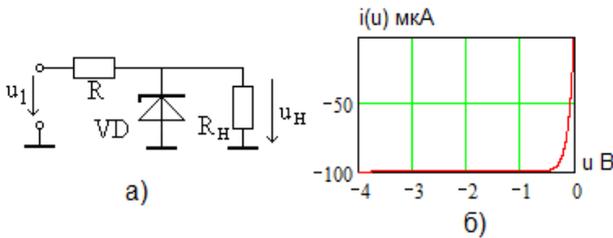


Рис. 9.10

Эффективность работы электронного стабилизатора оценивается **коэффициентом стабилизации**, равным отношению относительной нестабильности выходного напряжения к относительной нестабильности напряжения нагрузки,

$$K_{CT} = \frac{\Delta u_1 / u_1}{\Delta u_H / u_H}, \quad (9.3)$$

где Δu_1 - колебание входного напряжения стабилизатора u_1 , вызывающее отклонение от заданного значения напряжения на нагрузке Δu_H . Чем больше K_{CT} , тем стабильнее выходное напряжение.

Важной характеристикой стабилизатора является **коэффициент полезного действия (КПД)**,

$$\eta = \frac{P_H}{P_1}, \quad (9.4)$$

где P_1 - величина входной мощности, поступающей от выпрямителя, а P_H - мощность, потребляемая нагрузкой.

Простые компенсационные стабилизаторы обладают низким КПД (меньше 50%). За счет этого увеличивается требуемая мощность силового трансформатора и выпрямителя, а также требуется отводить тепловую мощность рассеивания на проходном транзисторе. Если она превышает несколько ватт, то необходим громоздкий и дорогой **радиатор** и, возможно, вентилятор для принудительного отвода тепла.

Импульсные стабилизаторы (например, в системных блоках питания компьютеров) имеют высокий КПД и малые габариты, но создают импульсные помехи, мешающие работе радиоэлектронной аппаратуры.

Промышленность выпускает разнообразные интегральные схемы для источников питания, например, сравнительно дешевые интегральные схемы серии 142 в пластмассовых корпусах КТ-28-2 с тремя выводами (рис. 9.11).

Компенсационный стабилизатор типа КР142ЕН5А с выходным стабилизированным напряжением 5В при максимальном токе нагрузки 1,5А. На вход от выпрямителя подается напряжение от 7,5В до 15В, так, чтобы мощность рассеивания не превышала 1 Вт. В стабилизаторе имеется внутренняя **схема защиты**.

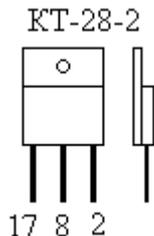


Рис. 9.11

Схема включения микросхемы КР142ЕН5А представлена на рис. 9.12а, емкость **электролитических** конденсаторов C_1 и C_2 выбирается не менее 10 мкФ. Величина выходного тока $i_{ВЫХ}$ не должна превышать значения $i_{ВЫХ\text{МАХ}} < 1,5\text{ А}$, при котором на стабилизаторе выделяется мощность, не превышающая допустимую $P_{ДОП}$ (при отсутствии радиатора $P_{ДОП} = 1\text{ Вт}$, а с радиатором $P_{ДОП} = 10\text{ Вт}$).

Рассеиваемая мощность P равна

$$P = (u_{ВХ} - u_{ВЫХ}) \cdot i_{ВЫХ},$$

отсюда

$$i_{ВЫХ} < \frac{P_{ДОП}}{u_{ВХ} - u_{ВЫХ}}.$$

Если $u_{ВХ} = 15\text{ В}$, то при отсутствии радиатора $i_{ВЫХ} < 0,1\text{ А}$.

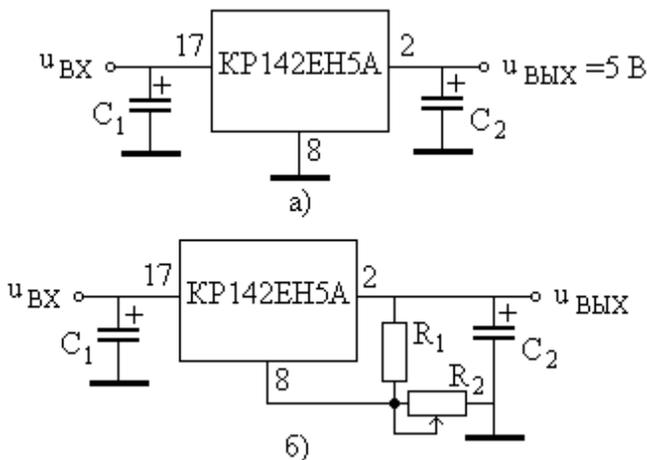


Рис. 9.12

На рис. 9.12б приведена схема включения интегральной схемы КР142ЕН5А, позволяющая регулировать выходное напряжение от 5В до $(u_{ВХ} - 3)В$. Обычно выбирают $R_1 = 300\text{Ом}$, а регулировка выходного напряжения обеспечивается сопротивлением $R_2 = 1\text{кОм}$.

Выпускаются стабилизаторы **отрицательного** напряжения с заданным и регулируемым значениями, например, КР142ЕН10, КР142ЕН11 и **двухполярные** стабилизаторы КР142ЕН6, формирующие два выходных напряжения $\pm 15В$.

Простейший импульсный стабилизатор напряжения рассмотрен в [3].

10. ГЕНЕРАТОРЫ СИГНАЛОВ

Генераторы радиотехнических сигналов строятся на основе нелинейных электронных элементов (например, транзисторов, интегральных схем) и отличаются разнообразием формы выходного сигнала, частотным диапазоном, мощностью и т.д.

Наиболее популярны генераторы гармонических колебаний (рис. 10.1а) и импульсные генераторы, примеры сигналов показаны на рис. 10.1б – рис. 10.1г (Т – период повторения).

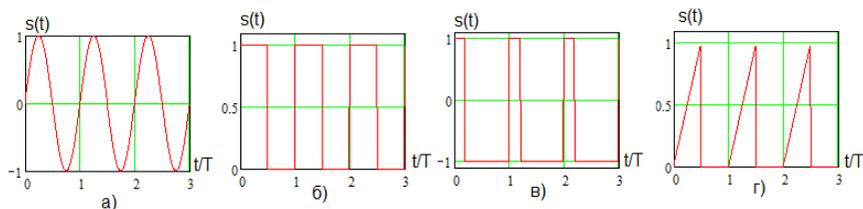


Рис. 10.1

Схемотехника генераторов весьма разнообразна и определяется предъявляемыми к ним техническими и конструктивными требованиями. Примеры реализации генераторов сигналов рассмотрены в [3].

Простейший импульсный генератор можно построить на базе интегральной схемы, называемой «триггер Шмидта», который представляет собой цифровой электронный элемент (рис. 10.2а), в котором зависимость выходного сигнала от входного имеет **гистерезисный** вид, показанный на рис. 10.2б.

Триггеры Шмидта реализованы в ТТЛ (КР155ТЛ1, КР155ТЛ2) и КМОП (КР561ТЛ1) сериях интегральных схем.

Микросхема КР561ТЛ1 (зарубежный аналог CD4093) содержит 4 триггера Шмидта с логикой 2И на входе. Ее внешний вид показан на рис. 10.3а, внутренняя структура – на рис. 10.3б, а таблица истинности – на рис. 10.3в.

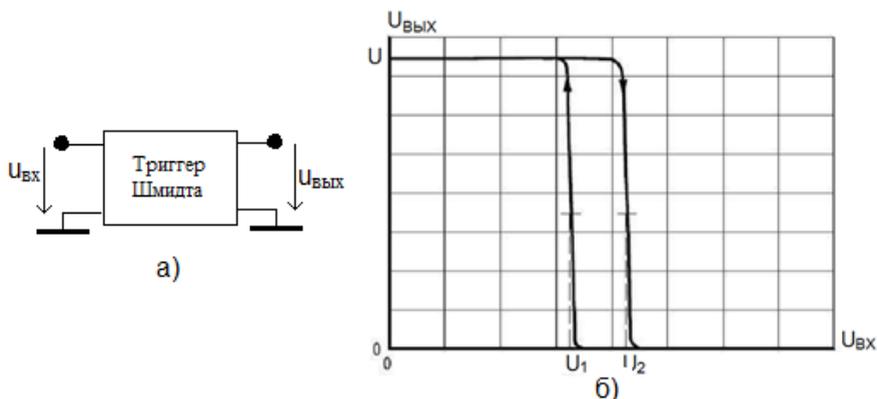


Рис. 10.2

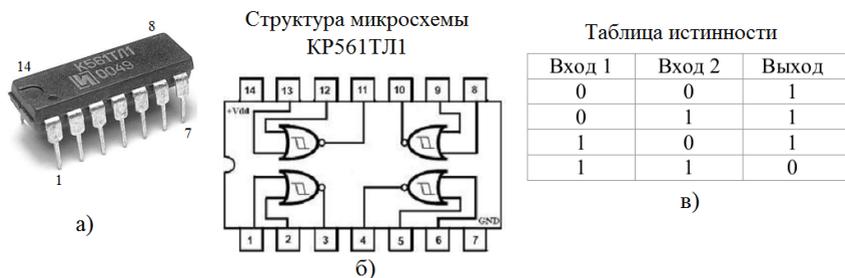


Рис. 10.3

При напряжении питания $+U_{dd}=10\text{В}$ пороговые напряжения $U_1=3,6\text{В}$ и $U_2=6\text{В}$, а при $+U_{dd}=5\text{В}$ соответственно $U_1=2,2\text{В}$ и $U_2=3\text{В}$.

На рис. 10.4а показана принципиальная схема генератора прямоугольных импульсов на базе триггера Шмидта, а на рис. 10.4б – ее схемотехническая модель. Для интегральных схем напряжения питания обычно не показываются, так как они подаются в соответствии с техническим описанием, например, в виде рис. 10.3б.

На рис. 10.5 показаны результаты моделирования при напряжении питания 5В , емкости конденсатора $C=1\text{нФ}$ и сопротивлении резистора $R=10\text{кОм}$, прямоугольные импульсы

соответствуют выходному напряжению $u_{ВЫХ}$, а треугольные – напряжению на емкости u_C .

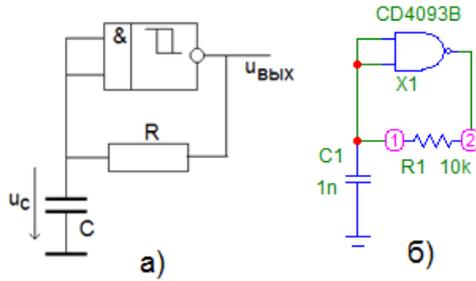


Рис. 10.4

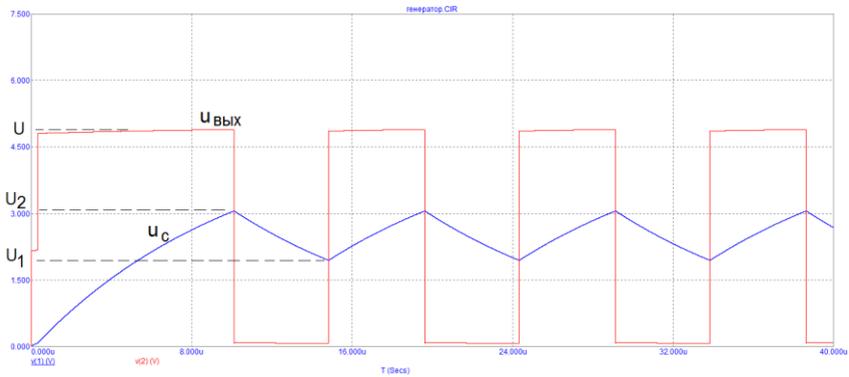


Рис. 10.5

Работа генератора основана на процессах заряда и разряда конденсатора C через резистор R . При включении напряжения питания $u_C = 0$ (уровень логического нуля на входе триггера Шмидта), напряжение на выходе триггера $u_{ВЫХ} = U \approx U_{dd} = 5 В$ (уровень логической единицы) и конденсатор заряжается через резистор R по экспоненциальному закону

$$u_C = U \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{RC} \right) \right),$$

до напряжения U_2 , как показано на рис. 10.5. Когда напряже-

ние на входе триггера достигает U_2 , он переключается, и выходное напряжение становится равным $u_{\text{ВЫХ}} = 0$, а конденсатор разряжается через резистор и напряжение на нем меняется по закону

$$u_C = U_2 \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

до тех пор, пока не достигнет значения U_1 . В этот момент времени триггер переключается в состояние $u_{\text{ВЫХ}} = U$, конденсатор начинает заряжаться через резистор и процесс колебаний повторяется, как показано на рис. 10.5.

Расчет параметров генератора приведен в [3].

11. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

11.1. Измерительные приборы

11.1.1. Генератор сигналов

Генератор АНР 1001 предназначен для формирования гармонических сигналов, импульсов напряжения прямоугольной и треугольной формы на частотах от 0,2 Гц до 2 МГц с амплитудой до 20 В. Его передняя панель показана на рис. 11.1.

Сигналы (гармонические или импульсные) выбираются переключателями в правой верхней части панели. Левее находятся переключатели частотных диапазонов и табло измерителя частоты (частотомера).

В нижней части передней панели расположены ручки регулировки формы и параметров выходного напряжения. При выполнении лабораторных работ используются левая (плавная установка частоты) и правая (регулировка амплитуды сигнала) ручки, а все остальные необходимо установить в **крайнее левое** положение.

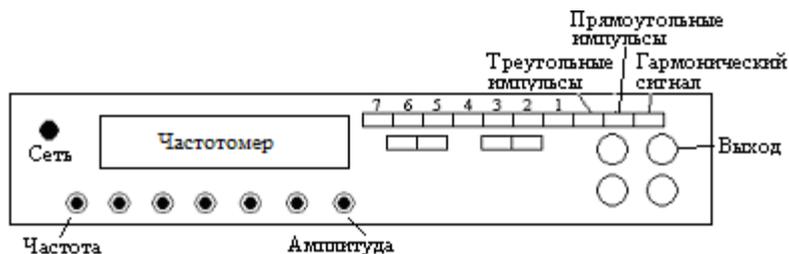


Рис. 11.1

Подготовка прибора к работе. Необходимо включить питание тумблером «сеть» и затем выбрать форму сигнала и диапазон рабочих частот, в котором находится требуемая частота сигнала. Ее установка обеспечивается ручкой плавной регулировки (крайней левой) по показаниям частотомера, а установка амплитуды выходного напряжения выполняется

ручкой регулировки уровня сигнала (крайней правой).

11.1.2. Вольтметры

Вольтметр **В7-26** используется при измерении постоянного (от 30мВ до 300В), гармонического напряжения (от 200мВ до 300В) и сопротивления двухполосника (резистора) на постоянном токе (от 10 Ом до 1000 МОм). Вид передней панели прибора представлен на рис. 11.2.

Подлежащая измерению величина выбирается переключателем «Режим» (слева направо измерение переменного напряжения U , отрицательного и положительного постоянного напряжения $-U$ и $+U$, сопротивления r_x). Предел измерения (цена максимального отклонения стрелки измерителя) для действующих значений напряжений выбирается переключателем пределов (шкала U) в зависимости от измеряемой величины. Для сопротивлений (шкала Ω) переключатель «Пределы измерения» задает множитель шкалы.

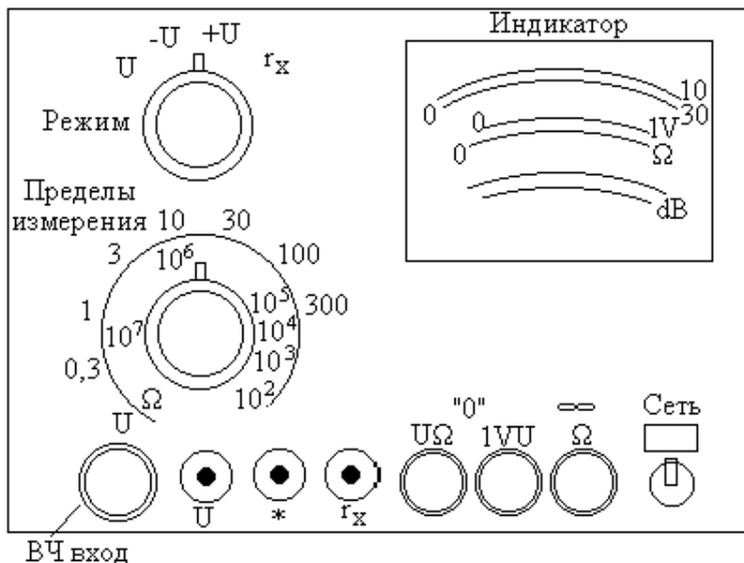


Рис. 11.2

Измеряемое напряжение подается на клеммы U и * (символом * обозначена «земля»). Измеряемое сопротивление соединяется с клеммами r_x и *.

Измеряемая величина определяется по одной из шкал «Индикатора». По двум верхним шкалам отсчитываются значения напряжения: по нижней шкале (30 делений) на пределах 3, 30 и 300В, а по верхней (10 делений) на пределах 10 и 100В. Для измерений на пределе 1В применяется третья сверху шкала 1V, на ней нулевое значение вынесено вправо относительно других шкал и используется для калибровки прибора. Измерение сопротивлений производится по четвертой сверху шкале Ω , полученные отсчеты **умножаются** на множитель, задаваемый переключателем «Пределы измерения».

Ручки $U\Omega$ и 1VU используются для калибровки нуля вольтметра, а правая « $\infty\Omega$ » - для калибровки бесконечных показаний омметра.

РАБОТА С ПРИБОРОМ

Калибровка. Прибор включается тумблером «Сеть» и после самопрогрева в течении нескольких минут выполняется его калибровка, которая затем **повторяется** каждые 15-20 минут. Для калибровки отключаются все внешние цепи и с помощью переключателя «Режим» выбирается измеряемая величина (напряжение или сопротивление).

В режиме измерения переменного напряжения переключатель «Режим» устанавливается в положение U, замыкаются клеммы U и *, выбирается предел измерения 1V и ручкой установки нуля 1VU устанавливается нулевой уровень по шкале 1V (смещен вправо по сравнению с другими шкалами). Затем выбирается предел 30В и ручкой установки нуля $U\Omega$ устанавливается общий ноль по остальным шкалам. Процедура повторяется 2-3 раза.

В режиме измерения сопротивления переключатель «Режим» устанавливается в положение r_x , замыкаются клеммы r_x и *, ручкой установки нуля $U\Omega$ добиваются нулевых показаний.

ний по шкале Ω . Затем клеммы r_x и * размыкаются и ручкой установки бесконечности « $\infty\Omega$ » добиваются бесконечных показаний по шкале измерения сопротивления. Эта процедура повторяется 2-3 раза.

Подготовка к работе. Переключателем «Режим» выбирается измеряемая величина и подбирается подходящий предел измерения. Напряжение подается на клеммы U и * (земля), а сопротивление подключается к клеммам r_x и *.

В режиме омметра *не забывайте отключать* все источники сигнала от измеряемого сопротивления.

Микровольтметром АВМ-1071 измеряются переменные напряжения с действующим значением от 100 мкВ до 300 В на частотах до 1 МГц. Передняя панель прибора показана на рис. 11.3.

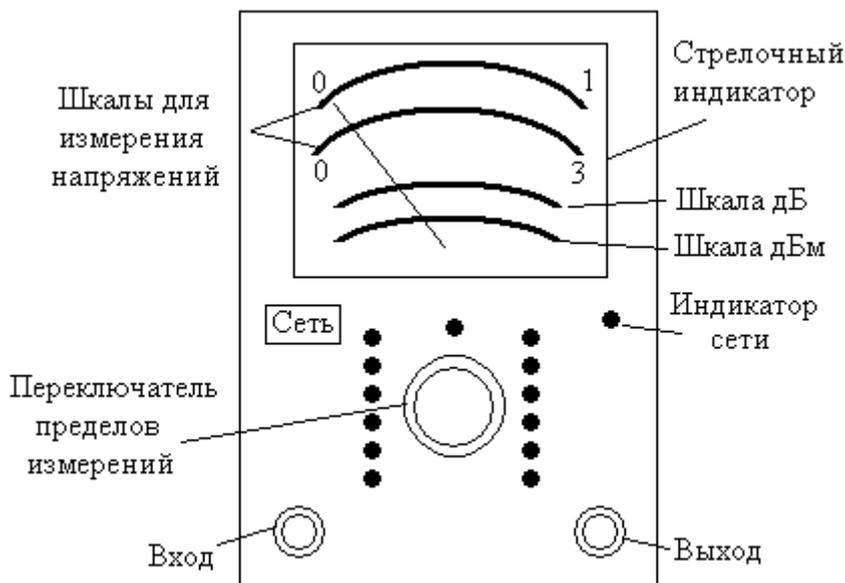


Рис. 11.3

Вольтметр включается кнопкой «Сеть», проводит процесс самотестирования и через 1 мин готов к работе (ручная

калибровка не проводится).

Напряжение измеряется по одной из двух верхних шкал максимальным значением 1 (для пределов 1мВ, 10мВ, 100 мВ, 1В, 10В и 100В) и 3 (для 300мкВ, 3мВ, 30мВ, 300мВ, 3В, 30В и 300В). Предел измерения выбирается с помощью переключателя, светодиод указывает на выбранное значение.

Измеряемое напряжение подается на вход вольтметра (разъем в левом нижнем углу). Выход прибора (разъем в правом нижнем углу) используется для подключения осциллографа.

РАБОТА С ПРИБОРОМ

Для измерения напряжения с неизвестным уровнем переключатель пределов устанавливается в положение «300 В» и затем поворотом ручки подбирается необходимое значение.

11.1.3. Электронный осциллограф С1-55

Двулучевой электронный осциллограф **С1-55** предназначен для одновременной визуализации временных диаграмм двух сигналов и измерения их параметров по осям времени и уровня. Общее описание его работы приведено в предшествующем разделе. Внешний вид прибора показан на рис. 11.4.

Временная диаграмма входного напряжения изображается при движении электронного луча по слою люминофора на экране электронно-лучевой трубки. С двух сторон экрана находятся ручки управления лучами: яркостью - «Яркость» и «толщиной» луча – «Фокус» и «Астигматизм». Смещение изображения по горизонтали производится двумя ручками (грубо и плавно).

Наблюдаемое напряжение поступает на вход «Вх.1» или «Вх.2» одного из двух каналов вертикального отклонения луча КВО 1 или КВО 2. Переключатель 3/0 выбирает тип входа: закрытый или открытый. При выборе закрытого входа последовательно в сигнальную цепь включается разделительный кон-

денсатор и постоянная составляющая входного сигнала отсекается и не приводит к смещению луча по экрану. При выборе открытого входа разделительный конденсатор замыкается и по экрану осциллографа можно проводить измерения как переменных, так и постоянных во времени напряжений. Отдельно для каждого канала имеются ручки смещения луча по вертикали.

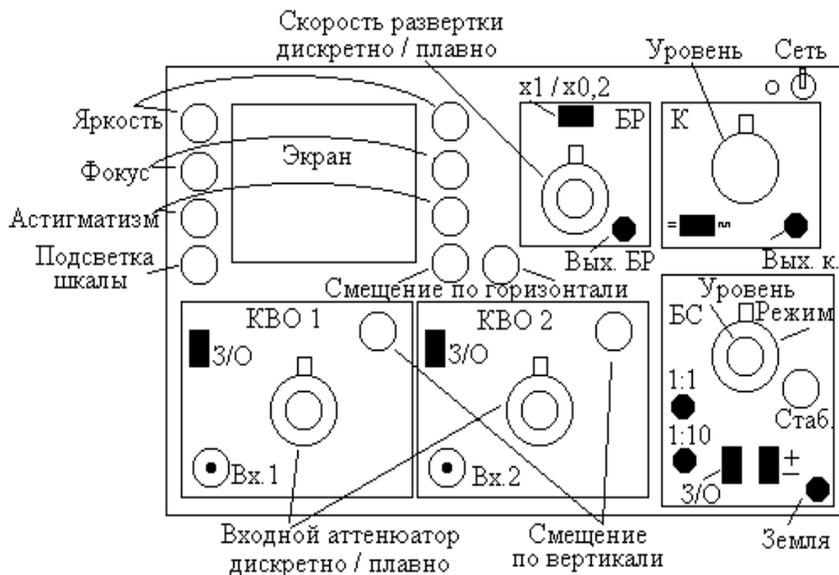


Рис. 11.4

Вертикальный размер изображения сигнала выбирается входным переключателем. Он состоит из непосредственно переключателя чувствительности канала, обеспечивающего заданный размер изображения в делениях сетки экрана (В/дел.), и плавного регулятора, расположенного сверху. В крайнем правом положении его ручки регулировки имеется фиксирующая защелка. *Только в этом случае* развертка по вертикали калибрована, и можно проводить измерение уровня сигнала по размеру изображения с учетом положения переключателя чувствительности канала, указывающего, сколько вольт приходит-

ся на одно деление сетки экрана. Развертка изображения по горизонтали осуществляется пилообразными импульсами напряжения $u_p(t)$ (рис. 11.5) от блока развертки (БР), обеспечивающими пропорциональность времени горизонтальной оси изображения входного сигнала $u_{вх}(t)$.

Скорость развертки определяется переключателем, указывающим, сколько миллисекунд (ms) или микросекунд (μs) приходится на одно деление сетки экрана по горизонтали при **крайнем правом** положении плавного регулятора развертки (в защелке), в противном случае развертка **не калибрована** и **нельзя** проводить измерения по оси времени.

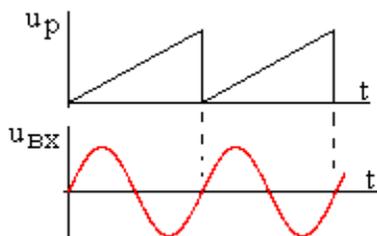


Рис. 11.5

Скорость развертки может изменяться тумблером « $\times 1/\times 0,2$ » с двумя положениями: $\times 1$ (скорость определяется положением переключателя скорости развертки) и $\times 0,2$ (показания переключателя необходимо умножить на 0,2). Последний вариант используется для анализа высокочастотных сигналов и в лабораторных работах не используется.

Для обеспечения устойчивого изображения пилообразное напряжение развертки должно быть **синхронизировано** с входным сигналом. Это обеспечивает блок синхронизации БС. Применяются два вида синхронизации:

- **внешняя**, за счет подачи импульсов синхронизации на один из входов «1:1» или «1:10» БС, последний ослабляет сигнал синхронизации с коэффициентами 1:10;

- **внутренняя**, за счет выделения в БС синхроимпульсов из исследуемого сигнала первого или второго каналов вертикального отклонения.

Режим синхронизации выбирается переключателем «Режим» с положениями «Внешн.» (от внешнего источника), «Внутр. 1» и «Внутр. 2» (от входного сигнала первого или второго). Переключатель З/О выбирает закрытый или открытый вход для внешнего синхросигнала.

Переключатель «±» определяет способ формирования начала развертки по фронту («+») или срезу («-») синхроимпульса.

Используют два режима работы генератора развертки:

- **непрерывной развертки**, в котором пилообразные импульсы развертки формируются всегда и независимо от наличия или отсутствия синхроимпульсов от БС и входного сигнала осциллографа;

- **ждушей развертки**, в котором каждый очередной пилообразный импульс развертки выдается в ответ на поступивший синхроимпульс от БС, и если они не поступают, то развертка луча отсутствует (на экране нет изображения).

Наиболее *устойчивое изображение* получается в режиме ждущей развертки и внешней синхронизации.

Режим развертки выбирается ручками «Уровень» (над переключателем режима) и «Стабильность».

РАБОТА С ОСЦИЛЛОГРАФОМ

Осциллограф включается тумблером «Сеть» и при отсутствии входного сигнала на экране появляется изображение горизонтальной линии.

Ручка «Стаб.» устанавливается в *крайнее правое* положение, а ручка «Уровень» - в *среднее*, при этом осциллограф будет работать в режиме **непрерывной развертки**.

Изображение луча может отсутствовать по следующим причинам:

- недостаточна яркость луча, тогда требуется ручку «Яр-

кость» повернуть вправо;

- луч смещен за пределы экрана, тогда необходимо установить требуемое положение луча ручками смещения по вертикали и горизонтали.

На экране наблюдается горизонтальная линия с началом в левой части экрана. После подачи входного сигнала устанавливаются требуемые размеры изображения по вертикали переключателем чувствительности канала вертикального отклонения луча (В/дел.) и по горизонтали переключателем скорости развертки (с/дел.). Изображение может быть неустойчивым.

Для формирования устойчивого изображения выполняется синхронизация осциллографа (в режиме внешней синхронизации на вход «1:1» БС должен быть подан внешний синхросигнал). Для этого ручка «Стаб.» из крайнего правого положения поворачивается влево до погасания луча и возвращается назад до появления изображения. Затем ручкой «Уровень» в окрестности среднего положения добиваются стабилизации (хотя бы частичной) изображения. После этого опять поворачивают ручку «Стаб.» влево до погасания луча и возвращают назад до появления изображения, а затем вновь ручкой «Уровень» добиваются его устойчивости.

Процедура синхронизации повторяется 2-3 раза, при этом устанавливается режим ждущей развертки, в котором синхронность не нарушается при переключении переключателей чувствительности канала вертикального отклонения или скорости развертки.

По осциллограмме входного сигнала можно проводить измерения его уровня (амплитуды) и временных параметров (например, периода повторения) по их размерам в делениях сетки с последующим вычислением их величины по цене деления сетки.

Необходимо следить, чтобы ручки плавной регулировки входного **переключателя и скорости развертки находились в крайнем правом положении (в защелке)**, в противном случае будет нарушаться калибровка вертикальной и горизонтальной осей изображения.

11.1.4. Лабораторный стенд

Лабораторный стенд предназначен для выполнения лабораторных работ. Его внешний вид показан на рис. 11.6. Для каждой лабораторной работы используется специальная плата с установленными элементами (на стенд можно установить две платы).

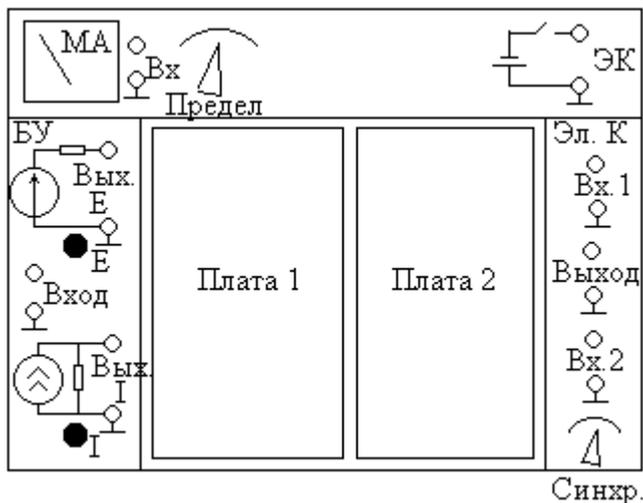


Рис. 11.6

Ток в исследуемой цепи измеряется миллиамперметром (МА), расположенным в верхней части стенда, его вход расположен рядом с измерителем тока. Предел измерения выбирается переключателем «Предел» с положениями 0,5 мА, 2 мА и 5 мА.

11.2. Лабораторные работы

11.2.1. Лабораторная работа № 1. Ознакомительная

11.2.1.1. В ходе лабораторной работы необходимо получить инструктаж по технике безопасности (прил. 1), ознако-

миться с измерительными приборами, приобрести простейшие навыки измерений тока, напряжения и сопротивления, ознакомиться с работой осциллографа.

11.2.1.2. К цепи, схема которой показана на рис. 11.7, подключите генератор гармонических сигналов, вольтметр и амперметр. С помощью вольтметра установите напряжение источника 4 В на частоте 40 кГц.

11.2.1.3. Установите максимальное переменное сопротивление R_2 , измерьте его значение. Измерьте ток в цепи.

11.2.1.4. Установите минимальное сопротивление R_2 , вновь измерьте ток в цепи.

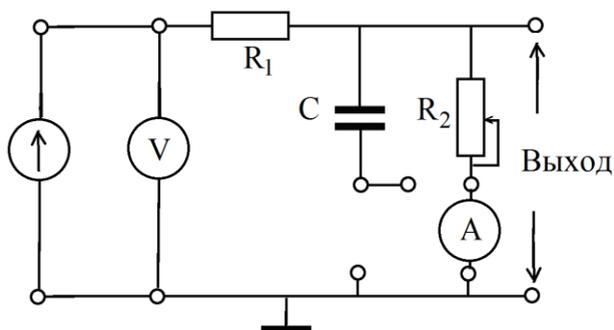


Рис. 11.7

11.2.1.5. Переключите вольтметр к выходу цепи (рис. 11.7), установите максимальное сопротивление R_2 , измерьте на нем напряжение. Изменяя сопротивление R_2 , проанализируйте изменение напряжения, сделайте выводы.

11.2.1.6. Подключите к выходу цепи осциллограф, установите устойчивое изображение напряжения, измерьте амплитуду и период сигнала.

11.2.1.7. Проанализируйте полученные результаты. **Отчет по ознакомительной лабораторной работе не оформляется.**

11.2.2. Лабораторная работа № 2. Резистивный делитель напряжения

11.2.2.1. Освойте расчетные соотношения.

В цепи на рис. 11.8 общее сопротивление $R_{\text{общ}}$ последовательно соединенных элементов R_1 и R_2 (емкость C отключена) определяется выражением

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2. \quad (11.1)$$

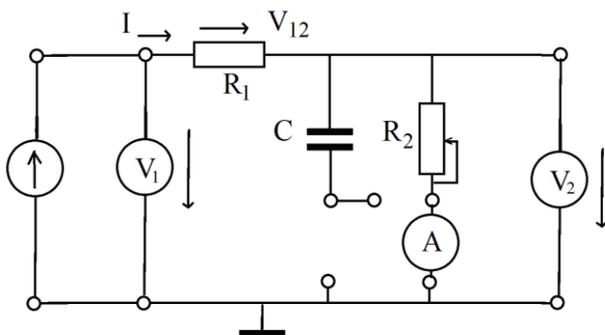


Рис. 11.8

Общий ток в цепи I вычисляется по закону Ома,

$$I = \frac{V_1}{R_{\text{общ}}}, \quad (11.2)$$

а затем определяются напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 соответственно

$$\begin{aligned} V_{12} &= I \cdot R_1, \\ V_2 &= I \cdot R_2. \end{aligned} \quad (11.3)$$

Напряжение V_{12} на сопротивлении R_1 можно вычислить и по второму закону Кирхгофа (сравните результаты)

$$V_{12} = V_1 - V_2 \quad (11.4)$$

(фазы этих напряжений одинаковы).

Потребляемые в сопротивлениях R_1 и R_2 мощности для действующих значений тока I и напряжений V_1 и V_2 равны

$$\begin{aligned} P_1 &= I^2 \cdot R_1 = I \cdot V_{12} = V_{12}^2 / R_1, \\ P_2 &= I^2 \cdot R_2 = I \cdot V_2 = V_2^2 / R_2. \end{aligned} \quad (11.5)$$

Потребляемая от источника мощность $P_{\text{Общ}}$ равна

$$P_{\text{Общ}} = I \cdot V_1 = I^2 R_{\text{Общ}}. \quad (11.6)$$

11.2.2.2. Соберите цепь с двумя вольтметрами, показанную на рис. 11.8. Установите напряжение источника $V_1 = 4 \div 6$ В с частотой $f = 40$ кГц и максимальное сопротивление R_2 , измерьте **омметром** его величину.

Измерьте протекающий ток I и напряжения V_1 и V_2 . По второму закону Кирхгофа в резистивной цепи найдите напряжение

$$V_{12} = V_1 - V_2$$

на сопротивлении R_1 , результаты внесите в табл. 11.1.

Таблица 11.1

I мА	V_1 В	V_2 В	$V_{1,2}$ В	I_p мА	V_p В

По известным напряжению V_1 и сопротивлениям R_1 и R_2 рассчитайте ток в цепи I_p и напряжение V_p на сопротивлении R_2 , результаты запишите в табл. 11.1. Сформулируйте и запишите выводы.

11.2.2.3. По измеренным значениям I , V_1 , V_2 и $V_{1,2}$ определите мощности P_1 и P_2 , потребляемые в сопротивлениях R_1 и R_2 а также в целом всей цепью $P_{ОБЩ}$, результаты внесите в табл. 11.2, сделайте выводы.

Таблица 11.2

P_1 мВт	P_2 мВт	$P_{ОБЩ}$ мВт

11.2.2.4. Интервал величин сопротивления R_2 от 0 до максимального разбейте на 6 - 8 значений и внесите их в табл. 11.3. Установите напряжение $V_1 = 4 \div 6$ В. Для каждого выбранного значения R_2 установите его с помощью омметра, измерьте ток I и напряжение V_2 .

Результаты запишите в табл. 11.3.

Таблица 11.3

№	R_2 Ом	I мА	V_2 В	K
1				
...				
8				

Вычислите коэффициент деления напряжения

$$K = \frac{V_2}{V_1},$$

результаты внесите в табл. 11.3. Постройте графики зависимостей $I(R_2)$, $V_2(R_2)$ и $K(R_2)$.

Сформулируйте и запишите выводы, оформите отчет по лабораторной работе.

11.2.3. Лабораторная работа № 3. Резистивно-емкостная цепь

11.2.3.1. Освойте необходимые расчетные соотношения.

В резистивно-емкостной цепи **модуль** сопротивления X_C емкости C равен

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (11.7)$$

а модуль полного сопротивления Z_1 показанного на рис. 11.9а последовательного соединения сопротивления R_1 и емкости C соответственно

$$Z_1 = \sqrt{(R_1)^2 + (X_C)^2}. \quad (11.8)$$

Для смешанной цепи на рис. 11.9б модуль полного сопротивления Z_2 определяется выражением

$$Z_2 = \sqrt{\left[R_1 + \frac{R_2}{1 + (2\pi f C R_2)^2} \right]^2 + \left[\frac{2\pi f C R_2^2}{1 + (2\pi f C R_2)^2} \right]^2}. \quad (11.9)$$

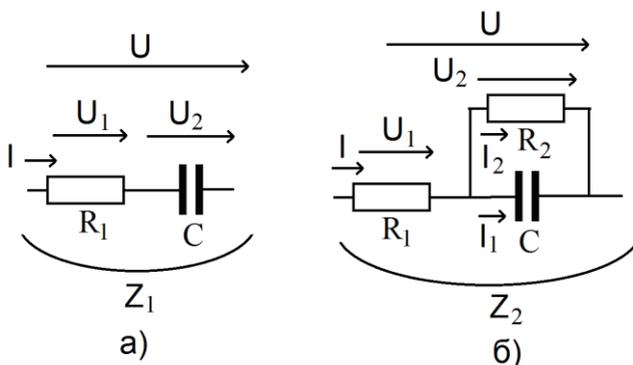


Рис. 11.9

В двухполюсной цепи амплитуды (и действующие значения) общего напряжения U и тока I связаны выражением закона Ома,

$$U = Z \cdot I, \quad (11.10)$$

Z - модуль полного сопротивления двухполюсника.

Для цепи на рис. 11.9а получим

$$\begin{aligned} U_1 &= I \cdot R_1, \\ U_2 &= I \cdot Z_C, \\ U &= I \cdot Z_1. \end{aligned} \quad (11.11)$$

Первый и второй законы Кирхгофа в цепи с реактивными элементами не выполняются для амплитудных и действующих значений гармонических токов и напряжений. Для цепи на рис. 11.9а сумма напряжений на элементах не равна общему напряжению

$$U \neq U_1 + U_2, \quad (11.12)$$

но выполняется соотношение

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}, \quad (11.13)$$

которое необходимо проверить в ходе лабораторной работы.

Для смешанной цепи на рис. 11.9б по закону Ома получим

$$\begin{aligned} U &= I \cdot Z_2, \\ U_1 &= I \cdot R_1, \end{aligned} \quad (11.14)$$

$$U_2 = I \cdot \frac{R_2}{\sqrt{1 + (2\pi f C R_2)^2}}.$$

И в этом случае второй закон Кирхгофа **не выполняется** для амплитудных и действующих значений напряжений,

$$U \neq U_1 + U_2. \quad (11.15)$$

По закону Ома можно записать

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U_2}{X_C}, \\ I_2 &= \frac{U_2}{R_2}. \end{aligned} \quad (11.16)$$

Сумма амплитудных или действующих значений токов **не равна** общему току в цепи,

$$I \neq I_1 + I_2, \quad (11.17)$$

однако выполняется равенство

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}. \quad (11.18)$$

11.2.3.2. Соберите цепь на рис. 11.10, установите напряжение источника $V_1 = 4 \div 6 \text{ В}$ с частотой $f = 40 \text{ кГц}$ и максимальное сопротивление R_2 , измерьте его значение. Измерьте ток I_2 и напряжение V_2 . Вычислите разность измеренных напряжений $V_1 - V_2$.

Результаты внесите в табл. 11.4.

11.2.3.3. При установленном напряжении источника V_1 рассчитайте токи I_P , I_{1P} , I_{2P} и напряжения V_{2P} , V_{12P} , запишите их в табл. 11.5. Сравните результаты, сделайте и запишите выводы.

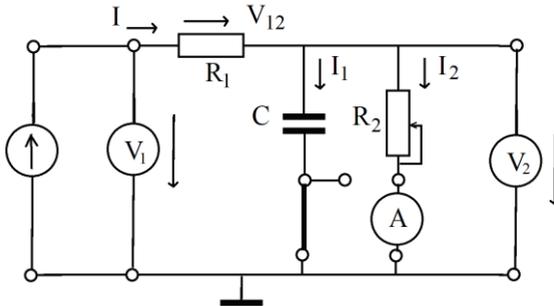


Рис. 11.10

Таблица 11.4

Цепь	I мА	I_1 мА	I_2 мА	V_1 В	V_2 В	$V_1 - V_2$ В
рис. 11.10	-	-				
рис. 11.11а	-		-			
рис. 11.11б		-	-			

Таблица 11.5

V_1 В	I_P мА	I_{1P} мА	I_{2P} мА	V_{2P} В	V_{12P} В

11.2.3.4. Переключите миллиамперметр в емкостную цепь, как показано на рис. 11.11а. Измерьте ток I_1 и напряжения V_1 , V_2 . Вычислите разность измеренных напряжений $V_1 - V_2$. Результаты внесите в табл. 11.4. Сравните с расчетными результатами в табл. 11.5, сделайте и запишите выводы.

11.2.3.5. Соберите цепь, показанную на рис. 11.11б. Измерьте ток I и напряжения V_1 , V_2 . Вычислите разность измеренных напряжений $V_1 - V_2$. Результаты внесите в табл. 11.4. Сравните их с расчетными результатами в табл. 11.5, сделайте и запишите выводы.

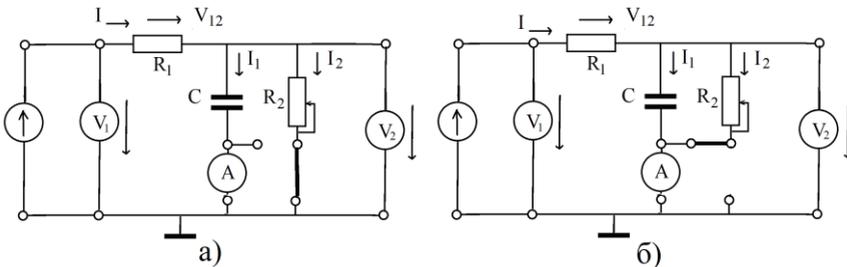


Рис. 11.11

11.2.3.6. Проверьте выполнимость соотношений (11.12), (11.13), (11.15), (11.17) и (11.18) по результатам измерений (табл. 11.4) и расчетов (табл. 11.5), сделайте выводы о применимости и неприменимости законов Кирхгофа для действующих значений токов и напряжений.

Оформите отчет по лабораторной работе, сохраните его, он понадобится при выполнении работы № 4.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

Установите регулятор резистора R_2 в среднее положение, измерьте его сопротивление и повторите измерения и расчеты по пунктам 11.2.3.1 – 11.2.3.6, результаты запишите в таблицы, аналогичные табл. 11.4 и табл. 11.5, сделайте выводы.

11.2.4. Лабораторная работа № 4. Схемотехническое моделирование резистивно-емкостной цепи

11.2.4.1. В программе **MicroCAP** постройте модель цепи, схема которой показана на рис. 11.12, задайте амплитуду напряжения источника V_1 , его частоту f и максимальное сопротивление R_2 , выбранные в лабораторной работе № 3.

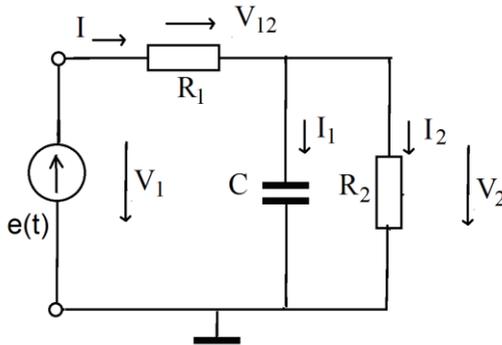


Рис. 11.12

Проведите ее схемотехническое моделирование.

11.2.4.2. Получите временные диаграммы токов i , i_1 , i_2 и напряжений u_1 , u_2 и u_{12} , приведите их в отчете, опишите свойства гармонических сигналов.

11.2.4.3. Определите амплитуды токов I , I_1 , I_2 и напряжений V_1 , V_2 и V_{12} . Вычислите их действующие значения.

ния. Результаты внесите в табл. 11.6.

Запишите в табл. 11.6 полученные в лабораторной работе № 3 результаты расчета и измерения этих величин, сравните полученные значения, сделайте выводы.

Таблица 11.6.

Результаты:	I мА	I_1 мА	I_2 мА	V_1 В	V_2 В	$V_1 - V_2$ В
моделирования						
расчета						
измерений						

11.2.4.4. Проверьте выполнимость соотношений (11.12), (11.13), (11.15), (11.17) и (11.18) по результатам моделирования, расчетов и измерений (табл. 11.6), сделайте выводы о применимости и неприменимости законов Кирхгофа для действующих значений токов и напряжений.

Оформите отчет по лабораторной работе.

ДЛЯ ПЫТЛИВЫХ

Выполните лабораторное задание в программе Work-Bench, сравните результаты.

11.3. Факультативное лабораторное задание «**Исследование операционного усилителя**»

11.3.1. Рассмотрите справочные параметры и характеристики типичного полного технического описания операционного усилителя (ОУ) КР544УД2 (прил. 2). Проанализируйте их, оцените близость рассматриваемого ОУ к идеальному, полученные **самостоятельно** результаты приведите в отчете.

11.3.2. Проведите расчет сопротивлений схемы усилителя на ОУ, показанной на рис. 11.13, по описанной в [3] методике.

11.3.3. На макетной плате смонтируйте усилитель по схеме на рис. 11.13.

11.3.4. К входу и выходу усилителя подключите левый и правый каналы электронного осциллографа, на вход подайте напряжение с действующим значением $0,1\text{В}$ и частотой 10 кГц от генератора гармонических сигналов.

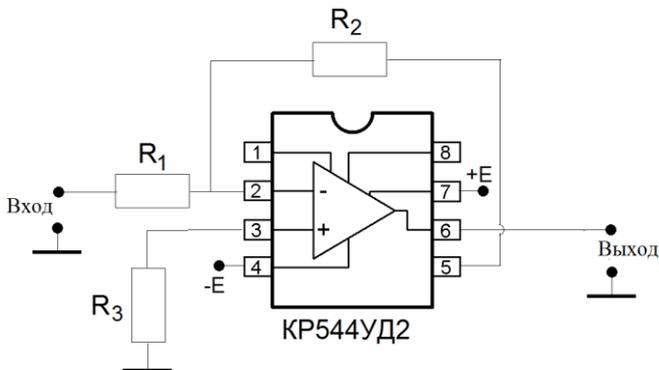


Рис. 11.13

11.3.5. Получите амплитудную характеристику ОУ – зависимость уровня выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ от входного $U_{\text{ВХ}}$, увеличивая уровень входного сигнала до появления заметных нелинейных искажений. По экрану осциллографа определите соответствующие амплитуды входного $U_{\text{ВХ}}$ и выходного $U_{\text{ВЫХ}}$ напряжений. Результаты измерения (10-15 точек) представьте в табл. 11.6. Постройте график амплитудной характеристики усилителя. Зарисуйте примеры временных диаграмм входного и выходного напряжений (можно сделать фотографии экрана осциллографа).

Таблица 11.6

Амплитудная характеристика

$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$				
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$				

11.3.6. По осциллограммам входного и выходного сигналов проведите измерение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) усилителя,

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}, \quad (11.19)$$

изменяя частоту генератора от 1 кГц до 300 кГц (10-20 значений). Для оценки АЧХ определите уровни входного $U_{\text{ВХ}}$ и выходного $U_{\text{ВЫХ}}$ напряжений, а затем их отношение (11.19).

Результаты внесите в табл.11.7.

Таблица 11.7

F, кГц				
$U_{\text{ВХ}}$, В				
$U_{\text{ВЫХ}}$, В				
K				

11.4. Дополнительные задания

В любой системе программирования (например, C++, Delphi) напишите программу, позволяющую рассчитывать токи и напряжения, строить графики частотных характеристик и временных диаграмм сигналов рассмотренных цепей.

Выберите схему электронного устройства (например, из [3]), смонтируйте действующий макет, проведите экспериментальные исследования, результаты представьте преподавателю.

11.5. Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется согласно **требованиям стандарта ВГТУ** [6] на отдельных скрепленных между собой листах формата А4. Текст отчета выполняется только в редакторе MicrosoftWord, шрифт TimesNewRoman 14, размеры полей: левое - 20 мм, правое - 10 мм, верхнее - 20 мм, нижнее - 20 мм. Вид титульного листа показан в прил. 3. Затем приводится содержание отчета, показанное на рис.11.14.

Введение	
1 Название раздела	
1.1 Название подраздела (если он есть)	
1.2 Название подраздела (если он есть)	
2 Название раздела	
Заключение	
Список литературы	
Приложение 1 Листинг программы	
Содержание	

Рис. 11.14

После выполнения *каждого пункта* задания делаются **развернутые индивидуальные выводы**.

Во введении излагается постановка задачи, указывается вариант задания, описываются методы исследования и необходимое обеспечение.

Разбиение материала на разделы производится студентом самостоятельно. Один раздел может охватывать один или несколько близких по смыслу пунктов задания. Раздел может разбиваться на подразделы.

Заключение содержит краткие общие выводы по проделанной работе, объединяющие выводы, сделанные ранее по каждому пункту лабораторного задания.

Приведенные рисунки и таблицы сопровождаются названиями. В тексте ссылки на рисунки и таблицы записываются сокращенно (рис. 1, табл. 2). Другие сокращения слов стандарт **запрещает**.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный материал ориентирован на формирование элементарных представлений о схемотехнике простых радиоэлектронных устройств и методах их расчета в рамках дисциплины «Введение в схемотехнику электрических цепей». Рассматриваются методы измерения токов, напряжений и параметров элементов. Он является основой для дальнейшего изучения теории цепей и методов проектирования радиоэлектронной аппаратуры.

Теоретический материал сопровождается примерами, рекомендуется проводить схемотехническое моделирование, использовать программирование на языках высокого уровня и экспериментальные исследования простых электронных устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литвиненко В. П. Основы теории цепей : учеб. пособие / В. П. Литвиненко, О. В. Чернояров. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. Ч. 1. –230 с.

2. Литвиненко В. П. Расчет линейных электрических цепей: учеб. пособие / В. П. Литвиненко, Ю. В. Литвиненко. –Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2006.–243 с.

3. Литвиненко В. П. Электронные устройства: расчет, моделирование, эксперимент: учеб. пособие/В. П. Литвиненко. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. 189 с.

4. Макаров Е. Г. Mathcad: учебный курс [Текст] / Е. Г. Макаров. СПб.: Питер, 2006. – 394 с.

5. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 / М. А. Амелина, С. А. Амелин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 464 с.

6. С т а н д а р т п р е д п р и я т и я (СТП ВГТУ 005-2007). Дипломное проектирование. Оформление расчетно-пояснительной записки и графической части. Воронеж: ВГТУ, 2007. 34 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ	4
1.1. Заряд, ток, напряжение, мощность, энергия	4
1.2. Элементы электрической цепи	6
1.3. Идеальные источники тока и напряжения.....	8
1.4. Основы топологического описания цепи.....	10
2. ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА	13
2.1. Модель цепи постоянного тока	13
2.2. Расчет цепи на основе закона Ома	13
2.3. Мощность в цепи постоянного тока	16
2.4. Задания для самостоятельного решения	17
3. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	18
3.1. Гармонический сигнал	18
3.2. Осциллографические измерения	20
3.3. Числовые значения сигналов	23
3.4. Мощность гармонических сигналов	24
3.5. Задания для самостоятельного решения	26
4. РАСЧЕТ ГАРМОНИЧЕСКИХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ	28
4.1. Расчет сопротивлений и проводимостей	28
4.2. Расчет токов и напряжений на основе закона Ома	35
5. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ	40
5.1. Измерение постоянного тока	40
5.2. Измерение переменного тока	43
5.3. Измерение постоянного напряжения	44
5.4. Измерение переменного напряжения	45
5.5. Электронные измерители тока и напряжения	46
5.6. Цифровые измерители тока и напряжения	47
5.7. Работа электронного осциллографа	49
6. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ	53
7. УСИЛИТЕЛИ СИГНАЛОВ	55
7.1. Задача усиления сигнала	55
7.2. Коэффициент усиления	56

7.3. Частотные характеристики	57
7.4. Усилитель с резистивно-емкостными связями	58
8. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ	61
8.1. Операционный усилитель	61
8.2. Усилители сигналов на базе ОУ	63
8.3. Прецизионный выпрямитель	67
9. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ	68
9.1. Структурная схема источника питания	68
9.2. Силовой трансформатор	69
9.3. Выпрямитель	71
9.4. Фильтр	73
9.5. Электронный стабилизатор напряжения	75
10. ГЕНЕРАТОРЫ СИГНАЛОВ	79
11. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	83
11.1. Измерительные приборы	83
11.1.1. Генератор сигналов	83
11.1.2. Вольтметры	84
11.1.3. Электронный осциллограф С1-55	87
11.1.4. Лабораторный стенд	92
11.2. Лабораторные работы	92
11. 2.1. Лабораторная работа № 1. Ознакомительная	92
11.2.2. Лабораторная работа № 2. Резистивный делитель напряжения...	94
11.2.3. Лабораторная работа № 3. Резистивно-емкостная цепь	97
11.2.4. Лабораторная работа № 4. Схемотехническое моделирование резистивно-емкостной цепи	101
1.4. Факультативное лабораторное задание «Исследование операционного усилителя» ...	102
11.4. Дополнительные задания	104
11.5. Оформление отчета	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	107
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ	111
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	112
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	116

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Оборудование лабораторного рабочего места питается от силовой сети переменного напряжения 220 В с частотой 50 Гц. При попадании на тело человека оно вызывает электрический удар, приводит к поражению нервной системы, головного мозга, дыхания, к мышечным судорогам. Опасным для человека является напряжение выше 36 В и ток более 10 мА.

Измерительные приборы и лабораторный стенд должны быть заземлены или подключены к нулевому проводу силовой сети. На их металлических корпусах не должно быть высокого напряжения и статического электричества.

Необходимо обратить внимание на исправность электропроводки, розеток и сетевых кабелей. При нарушении целостности изоляции, искрении и других неисправностях студент должен сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

На передних панелях исправных приборов и стенда высокие напряжения отсутствуют, и можно выполнять электрические соединения при включенном оборудовании. Запрещается касаться внутренних элементов стенда при снятых лабораторных панелях.

При выполнении студентом лабораторных работ он самостоятельно включает оборудование на рабочем месте, однако ему категорически запрещено включать силовую сеть в лаборатории.

При аварии оборудования, искрении или загорании запрещается отключать его от сети, вынимая вилки из розеток, гасить пожар водой и принимать другие подобные меры. Необходимо сообщить о происшествии преподавателю или лаборанту и, при необходимости экстренных действий, отключить электрическую сеть в лаборатории общим выключателем на силовом щите.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

БКО.348.257 ТУ

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ПОЛЕВЫМИ ТРАНЗИСТОРАМИ НА ВХОДЕ

K544УД2АТ KР544УД2А
K544УД2БТ KР544УД2Б
K544УД2ВТ KР544УД2В
K544УД2ГТ KР544УД2Г

ОСОБЕННОСТИ

- Низкий входной ток 40 нА (тип)
- Высокое входное сопротивление 10^{11} Ом
- Частота единичного усиления 30 МГц (тип)
- Полоса пропускания
 - $K_v = +1$ 20 МГц
 - $K_v = +5$ 12 МГц
 - $K_v = +20$ 12 МГц
- Производство усиления на полюсу пропускания $K_v = +20$ 200 МГц
- Скорость нарастания выходного напряжения
 - $K_v = +1$ 32 В/мкс
 - $K_v = +5$ 80 В/мкс
 - $K_v = +20$ 110 В/мкс
- Ток потребления 4,6 мА (тип)
- Малое время установления
- Полная внутренняя частотная коррекция
- Возможность управления внутренней частотной коррекцией для оптимизации динамических параметров

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Конструкция и схемное построение К/КР544УД2 направлены на достижение высоких динамических параметров при одновременном получении высокого входного сопротивления и низкого входного тока.

Интегральные микросхемы К/КР544УД2 выполнены по комбинированной биполярно-полевой технологии, формирующей на одном кристалле п-канальные полевые транзисторы с управляющим рп-переходом, рпп-транзисторы и вертикальные рпр-транзисторы. При этом за счёт использования полевых транзисторов на входе решаются проблемы входного сопротивления и входного тока, а сочетание этих же транзисторов и вертикальных рпр-транзисторов позволяет оптимально решить вопросы широкополосности и быстродействия при относительно небольшом токе потребления.

ИС К/КР544УД2 имеют полную внутреннюю частотную коррекцию, рассчитанную на все масштабные режимы отрицательной обратной связи, в том числе – повторитель напряжения. С целью оптимизации динамических параметров в каждом конкретном случае применения в К/КР544УД2 предусмотрена возможность управления внутренней коррекцией путём замыкания или размыкания выводов 1 и 8 микросхемы. При замыкании выводов 1 и 8 коррекция включается, при размыкании – отключается. Построение электрической схемы К/КР544УД2 обеспечивает устойчивую работу с отключённой коррекцией при масштабном коэффициенте усиления от 20 и выше. В таких случаях отключение коррекции значительно улучшает динамические параметры К/КР544УД2 по сравнению с традиционно используемым в аналогах её постоянным включением. Так при $K_v = +20$ достигается произведение усиление на полюсу пропускания более 200 МГц и скорость нарастания около 110 В/мкс.

В режимах повторителя напряжения ($K_v = +1$) и $K_v < 20$ используется полное включение внутренней частотной коррекции путём замыкания выводов 1 и 8.

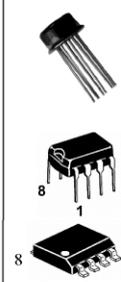
Для схем применения с коэффициентом усиления в диапазоне $1 < K_v < 20$ с целью улучшения динамических параметров допускается ослабление действия внутренней частотной коррекции за счёт включения между выводами 1 и 8 конденсатора 0,5+50 пФ.

Параметры К/КР544УД2 нормируются в диапазоне температур от -45°C до +70°C.

При монтаже микросхемы К/КР544УД2 должны соблюдаться правила монтажа и развязки по питанию высокочастотных схем.

ПРИМЕНЕНИЯ

- Быстродействующие интеграторы
- Схемы выборки и хранения
- Буферные усилители
- Усилители для фотоприёмников
- Импульсные усилители, широкополосные усилители и компараторы
- Генераторы высокочастотных колебаний с большой амплитудой выходного напряжения
- Стандартные схемы общего применения



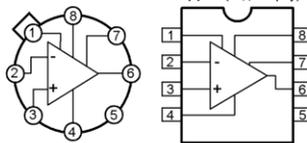
K544УД2
 Корпус 3101.8-8.01, 3101.8-8.01НБ
 Высота 4,8 мм
 Дл. выводов 13,5 мм
 Масса не более 2 г.

KР544УД2
 Корпус 2101.8-1
 Высота 3,5 мм
 Дл. выводов 3,5 мм

K544УД2Т
 Корпус 4303.8-В
 Высота 2,54 мм
 Дл. выводов 0,635
 Масса не более 0,1 г.

- 1 Баланс, коррекция
- 2 Вход инвертирующий
- 3 Вход неинвертирующий
- 4 Источник питания (минус)
- 5 Баланс
- 6 Выход
- 7 Источник питания (плюс)
- 8 Коррекция

Назначение выводов (вид сверху)



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МИКРОСХЕМ ($U_{CC} = \pm 15 \text{ В}$, $R_{H1} = 2 \text{ кОм}$, $C_H = 80 \text{ пФ}$)

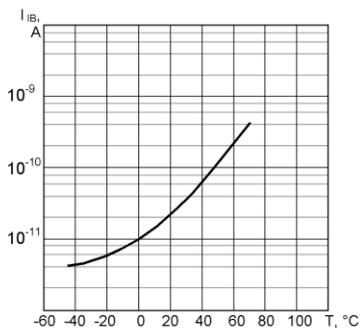
Символ	Параметр	T, °C	K544УД2А	K544УД2Б	KP544УД2В	KP544УД2Г
			KP544УД2А	KP544УД2Б	K544УД2ВТ	K544УД2ГТ
A_U	Коэффициент усиления напряжения, не менее	+25 +70 -45	20 000 12 000 10 000	10 000 6 000 5 000	20 000 12 000 10 000	20 000 12 000 10 000
$ U_{IO} $	Напряжение смещения, мВ, не более	+25 -45, +70	30 40	50 60	50 60	10 13
αU_{IO}	Температурный коэффициент напряжения смещения нуля, мкВ/°C, не более	от +25 до +70 от +25 до -45	50	100	100	30
$ I_I $	Средний входной ток, нА, не более	+25 +70	0,1 5	0,5 25	1 50	0,1 5
$ I_{IO} $	Разность входных токов, нА, не более	+25	0,1	0,5	1	0,1
K_{CMR}	Коэффициент ослабления синфазных входных напряжений, дБ, не менее	+25	70	70	70	70
K_{SVR}	Коэффициент влияния нестабильности источников питания на напряжение смещения, мкВ/В, не более	+25	300	300	300	300
f1	Частота единичного усиления, МГц, не менее	+25	15	15	15	15
SR	Максимальная скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс, не менее	+25	20	20	10	20
$ U_{OMAX} $	Максимальное выходное напряжение, В, не менее	+25 -45, +70	10	10	10	10
I_{CC}	Ток потребления, мА, не более	+25 +70 -45	7 6,5 7,5	7 6,5 7,5	7 6,5 7,5	6 5,5 6,5

ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Напряжения питания $\pm 13,5 \text{ В}$ и $\pm 16,5 \text{ В}$
(допускается эксплуатация в интервале от $\pm 5 \text{ В}$ до $\pm 13,5 \text{ В}$)

Синфазное входное напряжение не более $|\pm 10 \text{ В}|$

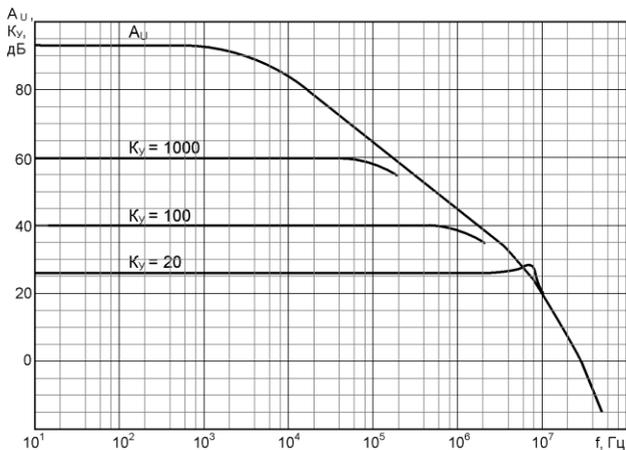
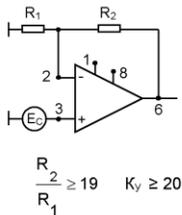
Диапазон рабочих температур -45°C , $+70^\circ\text{C}$



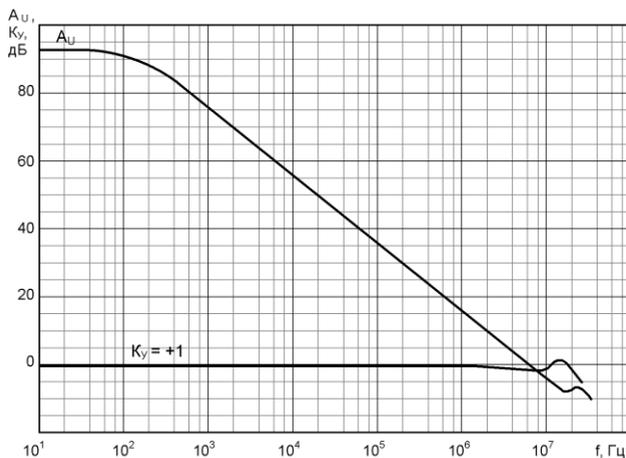
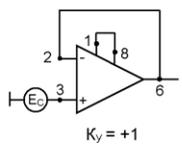
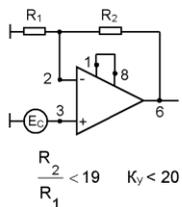
Типовая зависимость входного тока от температуры среды



Организация внутренней частотной коррекции К/КР544УД2

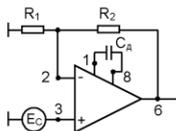


Оптимальное включение К/КР544УД2 при $K_y \geq 20$
 (внутренняя частотная коррекция отключена)



Включение К/КР544УД2 при $K_y < 20$ и
 в режиме повторителя напряжения
 (внутренняя частотная коррекция включена)

$$1 < K_y < 20$$

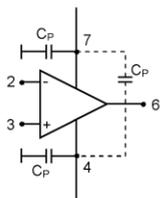


Вариант ослабления внутренней частотной коррекции за счёт включения дополнительного конденсатора между выводами 1 и 8.
 $C_d = 0,5 + 50$ пФ



ТИПОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ К/КР544УД2 В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Параметр	Режим	Состояние выводов 1 и 8	Типовое значение параметра
Частота единичного усиления	Без обратной связи	разомкнуты	30 МГц
Произведение усиления на полосу пропускания	$K_y = +20$	разомкнуты	200 МГц
Полоса пропускания	$K_y = +1$	замкнуты	20 МГц
	$K_y = +5$	$C_d = 8,2$ пФ	12 МГц
	$K_y = +20$	разомкнуты	12 МГц
Скорость нарастания выходного напряжения	$K_y = +1$	замкнуты	32 В/мкс
	$K_y = +5$	$C_d = 8,2$ пФ	80 В/мкс
	$K_y = +20$	разомкнуты	110 В/мкс
Полоса полного выхода ($U_{\text{вых}} = 10$ В)	$K_y = +1$	замкнуты	0,55 МГц
	$K_y = +20$	разомкнуты	1,6 МГц
Время установления до 0,05%	$K_y = -1$	замкнуты	0,7 мкс



Вариант развязки К/КР544УД2 по цепям питания

$$C_p = 0,1 + 0,3 \text{ мкФ}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

КАФЕДРА РАДИОТЕХНИКИ

ОТЧЕТ

по лабораторной работе № _____

(название работы)

студента

(ФИО)

« ____ » _____ 20 1__ г. _____

(дата)

(подпись)

Факультет радиотехники и электроники (ФРТЭ)

Направления (специальности) подготовки 11.03.01

«Радиотехника»

Профиль (специализация) «Радиотехнические средства
передачи, приема и обработки сигналов»

Курс первый, группа РТ _____

« ____ » _____ г. _____

(дата аттестации) оценка, полученная при аттестации

Руководитель _____ доцент Литвиненко В.П.

Воронеж 201__ г.

Учебное издание

Литвиненко Владимир Петрович
Литвиненко Юлия Владимировна

**ВВЕДЕНИЕ В СХЕМОТЕХНИКУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЦЕПЕЙ**

Учебное пособие

Подписано в печать 16.02.2018.

Формат 60x84/1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 7,3. Тираж 350 экз. Зак. №

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский просп., 14