

И. Н. Добротворский

Лабораторный практикум по основам теории цепей

*Учебное пособие
для вузов*



И. Н. Добротворский

Лабораторный практикум по основам теории цепей

Под редакцией д-ра техн. наук, проф. В. П. Попова

*Допущено Министерством
высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов вузов, обучающихся
по специальности «Радиотехника»*

Москва «Высшая школа» 1986



ББК 31.211
Д56
УДК 621.3.06

Рецензенты: кафедра теоретической радиотехники и радиоизмерений Львовского политехнического института им. Ленинского комсомола (зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. Б. А. Мандзий); кафедра теоретических основ и общей электротехники Таганрогского радиотехнического института им. В. Д. Калмыкова (зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. С. Н. Басан)

Добротворский И. Н.

Д 56 Лабораторный практикум по основам теории цепей: Учеб. пособие для вузов по спец. «Радиотехника» / Под ред. В. П. Попова. — М.: Высш. шк., 1986. — 192 с.: ил.

Учебное пособие содержит общую методическую часть и описание лабораторных работ. Весь материал соответствует разделам курса. Практикум рекомендуется использовать совместно с учебником В. П. Попова «Основы теории цепей».

Д 2302010000—320
001(01)—86 117—86

ББК 31.211
6П2.1

© Издательство «Высшая школа», 1986

Предисловие

Данный лабораторный практикум является составной частью комплекса учебной литературы по курсу «Основы теории цепей». Комплекс состоит из трех книг: учебника (автор и научный руководитель комплекса д-р техн. наук, проф. В. П. Попов), сборника задач по теории цепей (авторы В. Н. Бирюков, В. П. Попов, В. И. Семенцов) и данного пособия. Настоящий практикум построен в соответствии с учебной программой, утвержденной Минвузом СССР 11 июля 1984 г., и охватывает основные разделы курса, основываясь на теоретическом материале, изложенном в названном учебнике. При подготовке к выполнению или защите каждой лабораторной работы студенты должны прежде всего изучить соответствующие разделы учебника [1], так как приводимые в каждой работе пояснения без глубокого предварительного изучения соответствующих разделов учебника недостаточны для понимания разбираемого материала. В пояснениях даются лишь основные теоретические положения, дополняющие учебник, разбирается работа универсального стенда и измерительной аппаратуры, акцентируется внимание на методических особенностях выполняемых экспериментов, производится оценка погрешностей измерений, рассматриваются области применения приборов, диапазоны измеряемых величин и т. д.

Лабораторный практикум включает в себя обязательные, факультативные, учебно-исследовательские работы для студентов первого и второго курсов. Типично учебно-исследовательской является, например, работа № 21, в которой анализируются цепи с активными элементами. Теоретический материал, лежащий в основе проводимых в данной работе исследований, рассмотрен в главе «Четырехполосники» учебника [1]. Таким образом, тематика работы не выходит за пределы изучаемых разделов курса. Однако запланированные эксперименты допускают исследования более глубокие, чем производимые традиционным образом. Некоторые работы могут быть использованы для УИРСа.

Все лабораторные работы выполняются фронтальным методом после того, как материал данной темы изложен на

лекции. Исключение сделано для первых двух работ. Произошло это потому, что на первом занятии студенты должны начать изучение универсального стенда, важнейшей частью которого являются источники сигналов. Поэтому в первой лабораторной работе исследуются свойства реальных источников, во второй — знакомятся с правилами пользования важнейшим измерительным прибором — осциллографом. Самые простые осциллографические измерения удобнее всего производить при определении коэффициента передачи простейших резистивных цепей, поэтому вторая работа посвящена изучению этой темы. Поскольку по ряду методических, организационных, технических или некоторых других причин материал по данным темам ко времени выполнения этих работ может оказаться еще не прочитанным на лекциях, описания работ № 1 и 2 даны более подробно, чем последующие, с тем чтобы студенты могли изучить этот материал самостоятельно.

Все исследуемые цепи в данных работах собирают только из резистивных элементов и измеряют среднеквадратичные (действующие) значения напряжений и токов гармонической формы. При этом все приводимые математические выражения аналогичны соответствующим выражениям для цепей постоянного тока и студентам должны быть известны.

В лабораторном практикуме приведено работ больше, чем требуется по учебной программе. Это дает возможность преподавателям выбирать те работы и такие варианты заданий, которые отвечают педагогическим замыслам наилучшим образом.

Автор выражает благодарность рецензентам: сотрудникам кафедры теоретической радиотехники и радиоизмерений Львовского политехнического института им. Ленинского комсомола (зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. Б. А. Мандзий) и кафедры теоретических основ и общей электротехники Таганрогского радиотехнического института им. В. Д. Калмыкова (зав. кафедрой канд. техн. наук, доц. С. Н. Басан) за внимательный просмотр рукописи и замечания, способствующие улучшению книги, а также канд. техн. наук, доц. Г. Н. Драго за подбор примеров к работе № 21 и научному руководителю д-ру техн. наук, проф. В. П. Попову за ценные предложения, внесенные в процессе работы.

Пожелания и замечания по книге просим направлять по адресу: Москва, 101430, ГСП-4, ул. Неглинная, д. 29/14, издательство «Высшая школа».

Автор

Введение

Домашняя подготовка. Подготовка к выполнению каждой лабораторной работы должна начинаться за 5—7 дней до ее выполнения, с тем чтобы была возможность основательно разобраться в теоретической части материала. Следует помнить, что чем добросовестнее производится подготовка к выполнению работы, тем лучше закрепляется изучаемый материал, более глубокими и прочными оказываются знания, что облегчает подготовку к экзаменам. Изучив по учебнику указанный раздел, необходимо внимательно прочитать описание данной работы. Затем необходимо составить таблицы и приступить к выполнению предварительного расчета. Расчеты лучше выполнять в рабочей тетради, а не на разрозненных листах бумаги. Вычисление можно производить с помощью логарифмической линейки, электронных калькуляторов, а в некоторых случаях и ЭВМ. Если это предусмотрено заданием, то нужно заготовить графики, причем их масштабы желательно выбирать такими, при которых формы кривых приближаются к квадратным. Вычерчивать графики рекомендуется на миллиметровой бумаге и по возможности различными цветами. Длина координатных осей может быть 80—220 мм, в зависимости от количества кривых. Все штрихи на координатных осях наносят на равных расстояниях друг от друга, указывают только округленные числовые значения величин и их размерности. Важной частью подготовки являются ответы на вопросы для самостоятельной проверки знаний. У студентов при этом устанавливаются критерии, по которым можно судить о степени освоения теоретического материала изучаемого раздела и подготовленности к выполнению лабораторного задания. Если имеются вопросы, при ответе на которые студент испытывает затруднения, то нужно еще раз прочесть этот материал по учебнику или обратиться к преподавателю за консультацией. Только после того, как получены ответы на все во-

просы для самопроверки, предварительную подготовку к работе можно считать законченной. Преподаватель, ведущий занятия, должен подтвердить правильность и достаточность всей предварительной подготовки. Допускать к работе может преподаватель непосредственно либо с помощью контролирующих устройств или каких-либо иных ТСО, имеющихся на кафедре.

Правила работы в лаборатории. До начала работы с аппаратурой студенты должны пройти инструктаж по технике безопасности и в последующем строгойше выполнять все изученные положения.

Существуют правила, которые должны учитываться при работе с любыми электротехническими устройствами. В соответствии с п. 30 ГОСТ 12.1.009—76 малым является напряжение не более 42 В, поэтому студенты не должны вскрывать макеты, приборы или какую-либо аппаратуру, поскольку в них могут оказаться неизолированные участки с напряжением более 42 В. Нельзя касаться корпусов двух приборов одновременно. При нормальной работе корпуса приборов должны быть соединены между собой и иметь одинаковые потенциалы. В случае, когда корпус одного прибора заземлен, а корпус другого почему-либо не соединен с общим проводом и к тому же изоляция силового трансформатора имеет недостаточно большое сопротивление, между корпусами этих приборов может оказаться сетевое напряжение, что опасно.

По этой же причине нельзя при работе с электроустановками касаться неизолированных проводников и устройств, имеющих нулевой потенциал (водопроводные трубы, отопительные радиаторы и т. д.). Студенты должны научиться работать с аппаратурой одной рукой, что позволит исключить касание двух приборов одновременно. Категорически запрещается включать аппаратуру, если в помещении находится менее двух человек. Нельзя пользоваться неисправной аппаратурой, проводниками с пониженной изоляцией.

При возникновении опасности следует прежде всего отключить сеть питания и сообщить преподавателю или лаборанту о случившемся. При поражении током необходимо оказать первую помощь пострадавшему: если произошло загорание аппаратуры — отключить напряжение сети, использовать огнетушители и иные средства гашения огня.

Возможны случаи, когда несоблюдение правил эксплуатации аппаратуры не вызывает травм, но ведет к порче приборов. Например, не следует замыкать накоротко

выводы источников питания, генераторов и тому подобных устройств, или подключать резистор с малым сопротивлением, поскольку при этом в цепи могут возникнуть значительные токи, что может вывести аппаратуру из строя. При работе с вольтметрами нужно знать порядок измеряемого напряжения либо устанавливать переключатель так, чтобы стрелка прибора не делала сильных бросков и по возможности не зашкаливала. При работе с осциллографом нельзя допускать, чтобы на экране оставалась светящаяся точка, так как люминофор экрана при этом выгорает.

При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать правила, направленные на повышение точности измерений. Важнейшим из них является соединение корпусов генератора и измерительных приборов; при этом их потенциалы будут одинаковыми. В случаях, когда сделать это не удастся, корпусные точки приборов должны быть соединены так, чтобы разность потенциалов между ними была наименьшей. При экспериментах, выполняемых в соответствии с данным лабораторным практикумом, наибольшее напряжение на измерительных резисторах не превышает 1 В.

Выполнение работы. Изучив правила техники безопасности и будучи допущенными преподавателем к работе, студенты могут начать собирать исследуемые цепи, подключать измерительную аппаратуру. Прежде чем включить источники питания, студенты должны получить на это разрешение преподавателя. После выполнения нескольких измерений полученные результаты необходимо показать преподавателю. Если в процессе работы были допущены какие-то неточности, то их еще можно исправить. Нельзя перебирать или разбирать собранные цепи без разрешения преподавателя. После выполнения работы преподаватель подписывает рабочую тетрадь каждого студента и делает соответствующую отметку в журнале.

Оформление отчета и защита выполненных работ. Студенты перед началом новой работы должны представить оформленные отчеты по предыдущей работе. На титульном листе должны быть: название министерства, к которому относится учебное заведение, названия института, кафедры, номер и название работы, инициалы и фамилия студента, номер группы, город, год выполнения работы. В отчете приводятся: краткие теоретические сведения, расчетные формулы, таблицы с рассчитанными и измеренными величинами, их графики, анализ полученных результатов, погрешностей измерений, выводы по работе. Защиту работ

проводят в отведенное для этого время. Важно, чтобы подготовка к работам, их выполнение и защита происходили постепенно, в течение всего семестра, а не откладывались на последние недели.

Лабораторный стенд. Для выполнения лабораторных работ по курсу «Основы теории цепей» удобно использовать специализированный стенд, позволяющий студентам выполнять фронтальным методом обязательные, учебно-исследовательские, факультативные работы. Стенд должен иметь следующие блоки: блок генератора сигналов (блок Г),

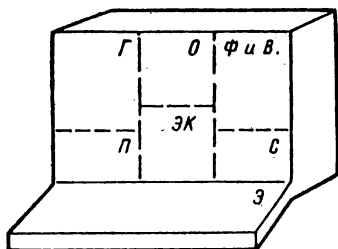


Рис. В.1

осциллограф (блок О); электронный фазометр (блок Ф), электронные вольтметры (блок В), блок питания (блок П), электронный коммутатор (блок ЭК), анализатор спектра (блок С), плату элементов цепей (блок Э). Конструктивно стенд может быть оформлен различным образом. Один из возможных вариантов стенда представлен на рис. В.1.

Поскольку студентам, особенно в начале изучения курса, ряд понятий еще неизвестен (например, скважность, временные и частотные характеристики и т. д.), назначение каждого блока и правила пользования им будут рассматриваться по мере изучения материала и выполнения лабораторных работ.

Рассмотрим устройства, входящие в стенд.

Б л о к г е н е р а т о р а (Г). В этом блоке создаются электрические сигналы с различными частотами и формами.

О с ц и л л о г р а ф (блок О). Осциллограф является универсальным прибором, позволяющим производить разнообразные измерения в электрических цепях. С помощью осциллографа можно определять амплитуду, форму сигналов, сдвиг фаз, наблюдать процессы, меняющиеся во времени, исследовать спектральные характеристики и производить множество иных измерений. С помощью осциллографа в последнее время измеряют также напряжения постоянного тока.

Э л е к т р о н н ы й ф а з о м е т р (блок Ф). С помощью этого прибора измеряется разность начальных фаз двух напряжений гармонической формы.

Электронные вольтметры (блок В). На стенде имеются три электронных вольтметра: вольтметр V_1 измеряет напряжение на выходе генератора (напряжение на входе исследуемой цепи), вольтметр V_2 — напряжение на выходе цепи, вольтметр V_3 — напряжение на промежуточных элементах или участках цепи, например на измерительных резисторах.

Блок питания (блок П). Для работы названных устройств необходимы источники питания, которые находятся в блоке П.

Электронный коммутатор (блок ЭК). Для расширения возможностей осциллографических измерений и исследований применяют электронный коммутатор, который позволяет наблюдать за экране однолучевого осциллографа сразу два изображения или ВАХ цепи. Такое устройство повышает устойчивость изображений и обладает рядом других возможностей.

Анализатор спектра (блок С). Этот прибор позволяет исследовать спектральный состав сложного периодического колебательного процесса, значительно расширить анализ явлений, происходящих в электрических цепях.

Плата элементов (блок Э). На плате Э размещены детали, из которых собирают исследуемые цепи — резисторы, индуктивные катушки, конденсаторы, нелинейные элементы, операционные усилители, некоторые вспомогательные и коммутирующие устройства. Внешний вид платы Э представлен на рис. В.2.

В верхнем левом углу находятся два ряда гнезд. Эти гнезда с помощью внешних проводников следует соединить с выходными зажимами генератора, причем нижние гнезда — с корпусным, а верхние — с потенциальным зажимом генератора. Напряжение источника напряжения E можно изменять регулятором « E —var», причем источник E является независимым, т. е. ЭДС источника не зависит от напряжений между какими-либо точками на плате Э или от тока, протекаемого в любой ветви исследуемой цепи. Источник тока I имеет два режима: независимый и зависимый. Если переключатель $П_1$ установить в положение «независимый», то ток источника определяется только его устройством и не зависит ни от напряжений, ни от токов в каких-либо точках или ветвях цепи. Если переключатель $П_1$ установить в положение «зависимый», то ток источника I оказывается зависимым от напряжения E . Ток источника в обоих случаях не зависит от сопротивления нагрузки, но

в независимом режиме значение тока постоянно, а в зависимом изменяется в соответствии с положением регулятора « $E - var$ ». Чем больше напряжение, устанавливаемое регулятором « $E - var$ », тем больше ток источника тока и наоборот. Магазин сопротивлений R_V имеет 11 позиций. Постоянные резисторы размещены в нижней части панели. Резистор, сопротивление которого можно изменять плавно, обозначают R_K . Сопротивления резисторов для всех стендов

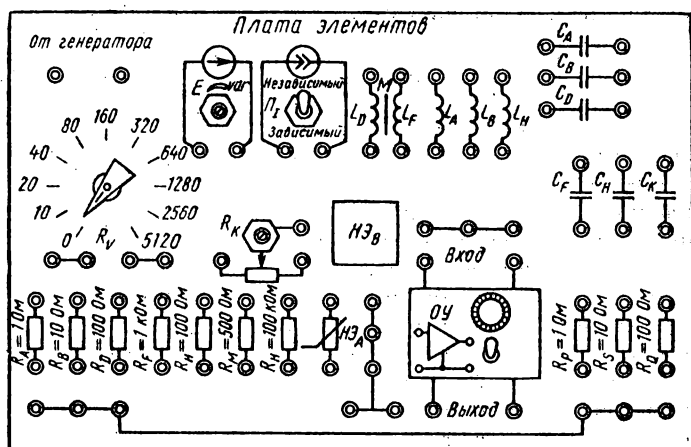


Рис. В.2

одинаковые, их значения указаны на передней панели. Следует обратить внимание на то, что все элементы на панели — резисторы, катушки, конденсаторы — имеют буквенные индексы, а соответствующие им значения — сопротивления, индуктивности, емкости, приводимые в формулах — цифровые. Индуктивные катушки обозначены L_A , L_B , L_D , L_F , L_H , причем на всех стендах $L_A = L_D = L_F$. Катушки L_D и L_F намотаны на одном сердечнике. Аналогично конденсаторы обозначены C_A , C_B , C_D , C_F , C_H , C_K , причем $C_A = C_D$. Параметры катушек, резисторов и конденсаторов для различных стендов приведены в приложении.

В нижней правой части панели размещен электронный контур, имитирующий RLC -цепь.

Измерение напряжений в цепях переменного тока. Для измерения падения напряжения на резисторе сопротивлением R , по которому протекает ток, необходимо параллельно этому резистору подключить вольтметр. В схеме рис. В.3

до подключения вольтметра протекал ток $I = E/(R_i + R)$, где E — ЭДС источника; R_i — внутреннее сопротивление источника. При этом напряжение на резисторе R составляет $U = IR = ER/(R_i + R)$.

После подключения вольтметра с внутренним сопротивлением R_V сопротивление внешней цепи (относительно источника энергии) уменьшается и становится равным $RR_V/(R + R_V) < R$, вследствие чего ток в неразветвленной цепи увеличивается: $I' = \frac{E}{R_i + RR_V/(R + R_V)} = \frac{E(R + R_V)}{R_i R + R_i R_V + RR_V}$, причем $I' > I = E/(R_i + R)$. Из-за

увеличения тока в неразветвленной части цепи возрастает падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника R_i и соответственно уменьшается падение напряжения на резисторе R . Таким образом, за счет подключения вольтметра падение напряжения на резисторе R уменьшается и показание вольтметра U_V оказывается

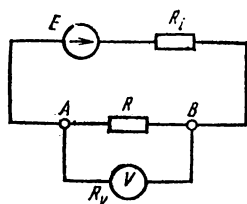


Рис. В.3

меньше падения напряжения на нем при отключенном вольтметре. Абсолютная погрешность, возникающая за счет шунтирования резистора R вольтметром R_V ,

$$\Delta U = U - U_V = \frac{ER}{R_i + R} - \frac{E(R + R_V)}{(R_i R + R_i R_V + RR_V)} \times \frac{RR_V}{(R + R_V)} = E \left(\frac{R}{R_i + R} - \frac{R}{R_i + R + R_i R/R_V} \right).$$

Погрешность ΔU , обусловленная подключением вольтметра к цепи, стремится к нулю, если $\frac{R_i R}{R_V} \rightarrow 0$. Поскольку значения R_i и R являются параметрами цепи и изменены быть не могут, для уменьшения погрешности ΔU внутреннее сопротивление вольтметра R_V должно быть увеличено. Аналогично, относительная погрешность $\delta_U = \Delta U/U$. Подставив в это выражение значения ΔU , U и произведя соответствующие преобразования, получим

$$\delta_U = \frac{R_i R}{R_V (R_i + R)} 100, \quad (\text{В.1})$$

где δ_U — в %.

Следовательно, чтобы показание вольтметра соответствовало падению напряжения на резисторе R при отключенном вольтметре ($\Delta U = 0$; $\delta U = 0$), необходимо иметь внутреннее сопротивление вольтметра бесконечно большим. Однако входное сопротивление реальных приборов имеет конечное значение, поэтому некоторая погрешность δU теоретически всегда имеет место. При больших входных сопротивлениях эта погрешность оказывается малой. Определим входное сопротивление вольтметра, при котором погрешность, обус-

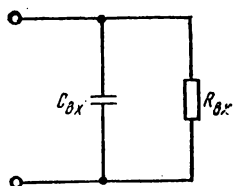


Рис. В.4

ловленная подключением прибора к цепи, не превышает некоторого наперед заданного значения. Согласно (В.1), $R_v \geq \frac{R_i R}{\delta (R_i + R)} \cdot 100$.

Таким образом, для измерений напряжений следует пользоваться вольтметрами с достаточно большими входными сопротивлениями. Вольтметры подразделяют на две группы — не имеющие и имеющие электронные усилители. У приборов, не содержащих усилителей, входное сопротивление мало, поэтому их применение для измерения напряжений в радиотехнических цепях ограничено. Вольтметры со специальными усилительными устройствами называют электронными. Такие вольтметры имеют большие входные сопротивления и потребляют во входной цепи очень малую мощность, обладают небольшой входной емкостью (рис. В.4), что дает возможность измерять напряжения в широком диапазоне частот. Комплексное входное сопротивление вольтметра

$$\begin{aligned} Z_{\text{вх}} &= \frac{R_{\text{вх}} \frac{1}{j\omega C_{\text{вх}}}}{R_{\text{вх}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{вх}}}} = \frac{R_{\text{вх}}}{1 + j\omega R_{\text{вх}} C_{\text{вх}}} = \\ &= \frac{1}{1/R_{\text{вх}} + j\omega C_{\text{вх}}}, \end{aligned} \quad (\text{В.2})$$

откуда модуль входного сопротивления

$$Z_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{вх}}}{\sqrt{1 + \omega^2 R_{\text{вх}}^2 C_{\text{вх}}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1/R_{\text{вх}}^2 + \omega^2 C_{\text{вх}}^2}}. \quad (\text{В.3})$$

Из выражений (В.2) и (В.3) следует, что с увеличением частоты входное сопротивление вольтметра уменьшается из-за снижения емкостного сопротивления. Следовательно,

чем меньше входная емкость, тем больше частота, на которой входное сопротивление прибора еще достаточно велико. В электронных вольтметрах входное резистивное сопротивление составляет единицы (иногда десятки) мегаом, а входная емкость — десятки пикофарад. Такими приборами можно измерять напряжения в диапазоне от десятков герц до единиц—десятков (при малых входных емкостях до сотен) мегагерц. Наличие электронного усилителя позволяет изготовлять приборы многопредельными, причем входное сопротивление на каждом пределе измерения оказывается достаточно большим (у приборов, не имеющих усилителей, с уменьшением номинального напряжения входное сопротивление прибора, как правило, снижается).

Уточним, каким образом следует правильно выбирать пределы измерений напряжений. Каждый вольтметр характеризуется классом точности прибора K и номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$, которое можно измерить на данном пределе. При измерении напряжения U возникает погрешность, обусловленная несовершенством работы прибора: $\delta = \beta K = \frac{U_{\text{ном}}}{U} K$. Таким образом, чем ближе измеряемое напряжение U к номинальному $U_{\text{ном}}$, тем при прочих равных условиях меньше погрешность δ . (Не путайте погрешность, обусловленную несовершенством работы измерительной аппаратуры, с методической погрешностью, вызванной реакцией прибора на измерительную цепь.) Следовательно, приборы и их пределы измерений следует выбирать так, чтобы при измерении стрелка отклонялась на возможно больший угол. В современных электронных вольтметрах пределы измерений изменяются через $\sqrt{10}$ (округленно 3), поэтому их часто выбирают по схеме 1—3—10—30—100... и т. д. В этом случае всегда можно подобрать предел, при котором $\beta < 3$, а погрешность $\delta \leq 3K$.

У электронных вольтметров имеются два входных зажима, к которым подводится измеряемое напряжение U . Один зажим соединен с корпусом вольтметра, его называют корпусным и обозначают \perp . Другой зажим называют потенциальным. При подключении в цепь электронных вольтметров следует соблюдать важное правило: корпусный зажим вольтметра должен быть соединен с корпусным зажимом генератора или общей точкой цепи. В тех случаях, когда ни одна точка цепи, на которой измеряется напряжение, не соединена с корпусом генератора, присоединять корпусный зажим вольтметра следует к той точке цепи, потенциал которой ближе к нулевому. При работе с аппаратурой

следует также следить за тем, чтобы корпуса приборов не касались друг друга. При несоблюдении этих правил погрешность измерений возрастает.

Корпусный и потенциальный зажимы легко определить экспериментально. Для этого переключатель пределов вольтметра нужно установить на 1 В (доли вольта) и поочередно дотрагиваться пальцем до каждого входного зажима вольтметра. При прикосновении к корпусному зажиму стрелка прибора или остается на месте, или слегка приближается к нулевой отметке, а при прикосновении к потенциальному зажиму она заметно отклоняется вправо.

Таким образом, при измерении напряжений следует насколько возможно уменьшить создаваемые погрешности. Для этого нужно брать приборы с большими внутренними сопротивлениями и выбирать пределы измерения так, чтобы при измерении стрелка прибора отклонялась на возможно больший угол.

Измерение токов с помощью электронных вольтметров. Для определения тока, текущего в некоторой ветви, необходимо измерительный прибор включить последовательно с нагрузкой, причем внутреннее сопротивление прибора должно быть много меньше сопротивления ветви, в которую этот прибор включен. Только в этом случае ток в цепи будет практически таким же, как и при отсутствии прибора. Электронные вольтметры с большими входными сопротивлениями (от долей до десятков мегаом) позволяют измерять напряжения в высокоомных цепях, не внося реакции за счет подключения прибора. Но именно из-за большого входного сопротивления их нельзя включать в цепь последовательно с нагрузкой, поскольку это резко уменьшает ток в цепи. Однако производить измерения в цепях переменного тока следует все же именно электронными приборами, поскольку такие приборы работают в широком диапазоне частот и потребляют от измеряемой цепи малую мощность, что существенно при работе с большинством электронных цепей. Чтобы измерить ток с помощью электронного вольтметра, поступают следующим образом. В ветвь, в которой необходимо измерить ток, последовательно с нагрузкой включают резистор $R_{ш}$. Падение напряжения на этом резисторе измеряют с помощью электронного вольтметра. Ток, текущий через резистор $R_{ш}$, а следовательно, и во всей цепи, $I = U_I / R_{ш}$, где U_I — напряжение вольтметра, включенного параллельно резистору $R_{ш}$. Включать резистор следует в разрыв проводника, идущего от корпуса генератора. В этом случае корпусная точка измерительного прибора

соединяется с корпусом генератора, что обеспечивает наилучшую стабильность работы прибора. Чем больше отличаются потенциалы корпусов генератора и электронного вольтметра, тем сильнее влияние различных дестабилизирующих факторов (паразитных емкостей) наводок, касания рук оператора и т. д. Поскольку падение напряжения на измерительных резисторах невелико, то вольтметры, измеряющие падения напряжений на таких резисторах, особенно чувствительны к разности потенциалов корпусов генератора и вольтметра.

Покажем, каким образом следует правильно выбирать измерительные резисторы $R_{ш}$. Чем меньше сопротивление $R_{ш}$, тем меньше (при прочих равных условиях) падение напряжения на резисторе и тем труднее точно его измерить, поскольку больше сказываются различные наводки, нестабильность в работе аппаратуры и т. д. Таким образом, для удобства измерения сопротивление $R_{ш}$, а следовательно, и падение напряжения на нем должны быть возможно большими. Однако увеличивать $R_{ш}$ можно только до тех пор, пока это не вызывает заметного уменьшения тока в ветви. На практике принято считать, что если $R_{ш} < 0,1Z_n$, где Z_n — модуль сопротивления ветви, то ток при включении резистора $R_{ш}$ остается практически таким же, каким был до его включения. Таким образом, резистор $R_{ш}$ должен иметь самое большое сопротивление, при котором не возникает заметного уменьшения тока в ветви. Следовательно, чтобы правильно выбрать резистор $R_{ш}$, следует знать примерное значение сопротивления цепи, в которой необходимо измерять ток. Значение сопротивления цепи можно определить либо аналитически, например из предварительного расчета, либо экспериментально, с помощью приближенного измерения. При выборе измерительного резистора $R_{ш}$ нужно учитывать, что в наших стендах имеются резисторы сопротивлением 1, 10 и 100 Ом.

В некоторых случаях ток в цепи можно найти, измерив напряжение на резисторе, сопротивление которого известно. При этом необходимость включения измерительного резистора отпадает.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 1.3; 2) изучить «Введение», описание лабораторного стенда; 3) заготовить табл. 1.1, 1.2.; 4) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: *изучить органы управления генераторов синусоидальных сигналов, освоить правила пользования ими и приобрести навыки работы с генераторами; снять*

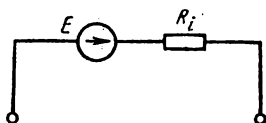


Рис. 1.1

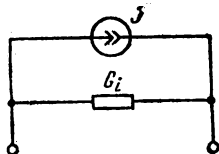


Рис. 1.2

внешние характеристики источников энергии и определить параметры их схем замещения; познакомиться с управляемыми (зависимыми) источниками напряжения и тока.

Источники электрической энергии делят на идеальные и реальные. Идеальными являются источники, потери в которых равны нулю. В реальных источниках потери имеют конечное значение, отличное от нуля.

Физически любой реальный источник обладает определенными потерями. В ряде случаев эти потери невелики, их можно не учитывать, а распределение напряжений и токов цепи считать практически неизменным. При работе в таком режиме источники считают близкими к идеальным. Реальный источник можно представить в виде: 1) схемы, в которой идеальный источник напряжения включен последовательно с резистором сопротивлением R_i (рис. 1.1); 2) схемы, в которой идеальный источник тока включен параллельно с резистором проводимостью G_i (рис. 1.2). Схему рис. 1.1 будем называть последовательной, а рис. 1.2—параллельной. Если внутреннее сопротивление R_i и проводимость G_i имеют конечные значения, то можно найти такие значения сопротивления нагрузки, при которых характеристики $U = f(I)$ или $U = f(R)$ оказываются близкими к идеальным. На практике предполагают, что для сопротивлений нагрузки, при которых характеристики реальных источников отличаются от идеальных не более чем на 10 %, реальные источники допустимо считать идеальными. Реальный источник (рис. 1.1) является практически идеальным источником напряжения в тех случаях, когда сопротивление нагрузки R превышает внутреннее сопротивление R_i хотя бы на порядок. Аналогично, источником тока, близким к идеальному, является всякий реальный источник, схема замещения которого соответствует показанной на рис. 1.2,

а проводимость на порядок меньше внутренней проводимости G_i . Таким образом, для рис. 1.1 при $0 < R_n < 0,1R_i$ источник является практически идеальным источником тока, а при $10R_i < R_n < \infty$ — идеальным источником напряжения. Аналогично, цепь, показанную на рис. 1.2, при $0 < R_n < 0,1\frac{1}{G_i}$ можно рассматривать

как идеальный источник тока, а при $10\frac{1}{G_i} < R_n < \infty$ — как идеальный источник напряжения. Легко видеть, что при $R_i = 0$ или $G_i = 0$ получают идеальные источники напряжения или тока при любых значениях сопротивлений нагрузки. Чем меньше внутреннее сопротивление R_i или проводимость G_i , тем шире диапазон внешних сопротивлений, при которых цепь близка к идеальной, и наоборот.

Реальные и идеальные источники напряжения и тока могут быть неуправляемыми (независимыми) и управляемыми (зависимыми). *Независимыми* называют источники, ЭДС или ток которых не зависит от напряжений или токов в любых участках исследуемой цепи. Например, транзисторный радиоприемник питается от сухих элементов или аккумуляторных батарей. В приемнике имеется много различных цепей, но ЭДС источника питания определяется только его конструкцией и не зависит от токов или напряжений ни на каком участке. Имеется, однако, большое число устройств, напряжение (ток) на выходе которых появляется только в том случае, когда на другом участке цепи имеется напряжение или протекает ток. Такие источники являются *зависимыми* (*управляемыми*).

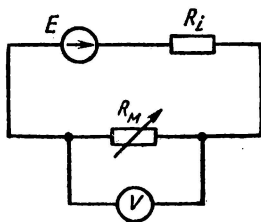


Рис. 1.3

Для определения параметров эквивалентных схем реальных источников собирают цепь, схема которой показана на рис. 1.3. С помощью магазина резисторов сопротивление R_m можно изменять в широких пределах. Если резистор R_m разомкнуть (или установить его сопротивление достаточно большим), то ток в цепи будет близким к нулю, поскольку входное сопротивление электронного вольтметра велико и током в его входной цепи можно пренебречь. В этом случае вольтметр показывает напряжение холостого хода U_x , численно равное ЭДС источника E . Если сопротивление R_m уменьшать, то ток в цепи начнет возрастать, падение напряжения на внутреннем сопротивлении увеличится, а на нагрузке уменьшится: $U = E - R_i I$. Если сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника, то напряжение $U_x = E$ будет распределяться поровну между R_i и R_m . Таким образом, сопротивление нагрузки, падение напряжения на которой составляет $0,5 E$, равно внутреннему сопротивлению источника. Если подключить R_m , при котором $U = 0,5 U_x$, не представляется возможным, то нужно установить иное сопротивление R . В этом случае внутреннее сопротивление $R_i = (U_x/U - 1) R$, где U — напряжение на R . Чем U ближе к $0,5 U_x$, тем выше точность измерения. *Внешней* или *нагрузочной характеристикой* источника называют зависимость напряжения на зажимах источника от его тока. Внешняя характеристика реального источника может быть приближенно представлена прямой линией проведенной через точки ($i = 0, u = U_x$) и ($i = i_K, u = 0$).

Задание. Определить назначение всех регуляторов и органов управления генератора синусоидальных сигналов, приобрести навыки в установке заданной частоты, напряжения, выходного сопротивления. Изучить органы управления электронных вольтметров и правила выбора пределов измерения при работе с вольтметрами. Экспериментально исследовать внешние характеристики двух источников. Рассчитать параметры элементов последовательной и параллельной схем замещения источников. Вычислить коэффициент управления зависимого источника.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Познакомиться с устройствами, из которых в данной работе собираются исследуемые цепи: генератором, электронным вольтметром, источниками напряжения и тока, магазином сопротивлений, регуляторами и переключателями, имеющимися на панели (рис. 1.4).

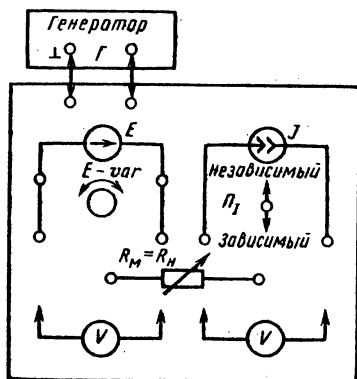


Рис. 1.4

2. Проанализировать размещение элементов на плате Э. На этой плате смонтированы элементы, из которых собирают исследуемые цепи, и два источника. Чтобы все устройства, находящиеся на плате, правильно работали, необходимо зажимы Г соединить с выходными зажимами генератора. Никаких регуляторов генератора в даль-

нейшем производить не требуется, но его регуляторы следует установить в определенные положения, изменять которые в процессе экспериментов не следует.

3. Познакомиться со шкалами и переключателями пределов электронных вольтметров. Включить сетевое напряжение, прогреть прибор, установить предел 1 В. Дотронуться пальцем поочередно до каждого зажима входного шланга прибора. При прикосновении к потенциальному (входному) зажиму стрелка прибора резко отклоняется вправо, а при прикосновении к корпусному остается на прежнем месте или приближается к нулевой отметке. Необходимо при сборке любой цепи сначала экспериментально определить

выводы прибора, затем соединить корпусные точки разных блоков.

4. Зажимы магазина R_m с подключенным к нему вольтметром соединить с выводами источника E (рис. 1.4). Регуляторы генератора установить в соответствии с заданием (например, выходное сопротивление 5 Ом, частота 5 кГц, выходное напряжение 3 В). На магазине R_m установить наибольшее сопротивление, проверить работу регулятора « $E - var$ ». Повернуть регулятор до отказа по часовой стрелке. При этом напряжение на зажимах источника будет наибольшим и вольтметр V покажет напряжение, численно равное ЭДС источника. Изменять значение сопротивления от максимального до нулевого. Найти сопротивление, при котором вольтметр показывает напряжение $0,5U_x$. Если такое сопротивление подобрать не удастся, то установить ближайшее возможное значение. Рассчитать внутреннее сопротивление источника. Результаты измерений занести в табл. 1.1.

5. Магазин сопротивления R_m и вольтметр V отключить от зажимов первого источника и подключить к зажимам второго. Так как напряжение на зажимах второго источника неизвестно, то сначала на вольтметре следует установить грубый предел (на 100 или 300 В), а затем переключать пределы так, чтобы отсчеты можно было бы производить наилучшим образом. Переключатель Π_1 установить в позицию «независимый». К выходным зажимам первого источника подключить вольтметр V . На магазине R_m установить сопротивление, при котором вольтметр V показывает наибольшее значение. Убедиться, что при повороте регулятора «меньше—больше» напряжение на зажимах первого источника меняется, а показания приборов в цепи второго источ-

Таблица 1.1

Первый источник			Второй источник		
Измерено при эксперименте		Рассчитано по экспериментальным данным	Измерено при эксперименте		Рассчитано по экспериментальным данным
R_m , Ом	U_2 , В	I , мА	R_m , Ом	U_2 , В	I , мА

Таблица 1.2

Измерено при эксперименте			Рассчитано по экспериментальным данным		
U_1 , В	U_2 , В	R_m , Ом	Коэффициенты управления		
			$\alpha_{упр}$	$\gamma_{упр}$	$R_{упр}$

ника не меняются. Изменять сопротивление R_m от максимального до нулевого, результаты измерений занести в табл. 1.1.

6. На магазине R_m установить наибольшее сопротивление. Переключатель Π_1 перевести в положение «зависимый». Убедиться, что напряжение второго источника при этом становится зависимым от напряжения первого источника. Снять зависимость $U_2 = f(U_1)$. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

7. Перевести переключатель Π_1 в положение «независимый». Убедиться, что второй источник снова становится независимым от первого.

Обработка результатов измерений

1. Построить нагрузочные характеристики $U = f(I)$ и $U = f(R)$ для каждого из исследуемых источников.

2. Определить значения нагрузочных сопротивлений, при которых каждый источник является практически: а) идеальным источником напряжения; б) идеальным источником тока.

3. Найти параметры элементов последовательной (e , R_i) и параллельной (j , G) схем замещения исследованных источников.

4. Построить внешние характеристики исследуемых источников.

5. Рассчитать коэффициенты управления зависимых источников.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Дайте определение независимым идеальным источникам напряжения и тока.

2. Каким образом экспериментально находят ЭДС и внутреннее сопротивление источников?

3. Какие схемы замещения источников вы знаете?

4. Каковы достоинства электронных вольтметров по сравнению с приборами, не содержащими усилителей?

5. Почему при измерении напряжений (токов) желательно, чтобы стрелка измерительного прибора находилась в правой половине шкалы?

6. Каким образом измеряются токи с помощью электронных вольтметров? Как выбрать сопротивления измерительных резисторов?

7. Каким образом экспериментально определяют потенциальный и корпусный зажимы вольтметров?

8. Какие типы управляемых источников вы знаете? Каковы размерности коэффициентов управления зависимых источников различных типов?

9. Каким образом выбирают приборы и пределы их измерений для определения напряжений (токов)?

10. Для цепи рис. 1.3 рассчитайте и постройте кривую мощности, рассеиваемой во внешней нагрузке при изменении ее сопротивления от нуля до бесконечности.

11. Рассчитайте мощность источника, рассеиваемую на внутреннем сопротивлении R_i (рис. 1.3) при $R_m = 0 \div \infty$.

12. Какая наибольшая мощность может рассеяться во внешней нагрузке, подключенной к источнику с параметрами $e = E = 10$ В; $R_i = 5$ Ом? Какое сопротивление должна иметь внешняя нагрузка R , чтобы в ней выделялась мощность 4 Вт?

13. Рассчитайте КПД цепи рис. 1.3 и постройте кривую $\eta = f(R_m)$.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) изучить описание данной работы; 2) заготовить табл. 2.1—2.3; 3) выполнить предварительный расчет; 4) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: изучить характеристики резистивных делителей напряжения при различных нагрузках, научиться измерять коэффициент передачи четырехполюсника с помощью электронно-лучевого осциллографа.

В общем случае периодически изменяющиеся электрические величины (напряжения, токи, ЭДС) характеризуются мгновенными, максимальными (амплитудными) и действующими значениями. Значение электрической величины в произвольный момент времени называют *мгновенным*. Мгновенные значения являются величинами переменными, т. е. зависят от времени. При гармонических воздействиях мгновенные значения тока и напряжения определяют из выражений

$$i = I_m \cos(\omega t + \psi_i); \quad u = U_m \cos(\omega t + \psi_u).$$

Максимальным (амплитудным) называют наибольшее из мгновенных значений за период. У гармонических напряжений и токов амплитудное значение есть величина постоянная, не зависящая от

времени. Действующим значением периодического переменного тока (напряжения, ЭДС) является такой постоянный ток, при котором в той же нагрузке за время, равное периоду, выделяется такая же энергия, как и при данном переменном токе. Действующее значение напряжения (тока) есть величина постоянная. Отношение действующего значения к амплитудному зависит от формы сигнала. У гармонических сигналов $U/U_m = 0,707$. Максимальное (U_m), действующее (U) значения и размах напряжения (U_p) связаны между собой постоянными коэффициентами, а следовательно, являются пропорциональными величинами. Например, для гармонических сигналов $U_m: U_p: U = 1:2:0,707$. Если цепь состоит из чисто резистивных элементов и питается от источника с постоянной во времени ЭДС, отклики (токи в ветвях и напряжения на участках цепи) пропорциональны воздействию. Так как действующее, амплитудное значение и размах напряжения при гармонических сигналах также не зависят от времени, как и при постоянном токе, а в резистивных цепях отсутствуют сдвиги фаз между напряжениями и токами, то рассчитывать отклики в таких цепях можно для этих параметров по тем же формулам, по которым они определялись в цепях постоянного тока.



Рис. 2.1

При анализе цепей на переменном токе вводят понятие положительного направления тока, причем если направление тока в цепи совпадает с выбранным положительным, то такой ток имеет знак плюс, а если противоположное, то минус.

Цепи, имеющие две пары внешних зажимов, называют *четырёхполюсниками*. У четырехполюсников различают входные и выходные зажимы (рис. 2.1). Коэффициент передачи цепи по напряжению $K = U_2/U_1 = U_{m2}/U_{m1} = U_{p2}/U_{p1}$. Коэффициент передачи K (для краткости слова «по напряжению» в дальнейшем тексте будем опускать) является важнейшей характеристикой цепи, так как дает возможность рассчитать напряжение на выходе по известному напряжению на входе. Очевидно, что $U_2 = KU_1$; $U_{m2} = KU_{m1}$; $U_{p2} = KU_{p1}$. (Для краткости все последующие выкладки будем производить для действующих значений, хотя с равным успехом их можно было бы производить и для максимальных значений и для размаха.) Коэффициент передачи любой линейной цепи не зависит от входного напряжения и определяется только параметрами элементов, из которых собрана цепь, а также способа их соединения. Чтобы рассчитать в линейной цепи коэффициент передачи, необходимо: 1) задаться произвольным напряжением на входе U_1 ; 2) любым методом вычислить напряжение на выходе U_2 ; 3) найти отношение U_2/U_1 (входное напряжение в расчетной формуле при этом сократится). Получившееся выражение не зависит от входного напряжения U_1 и является коэффициентом передачи цепи. Аналогичным образом можно определить коэффициент передачи по току $K_I = I_2/I_1$ или по мощности $K_P = P_2/P_1$.

Частные случаи 1. Рассчитаем коэффициент передачи Γ -образного четырехполюсника при холостом ходе на выходе (рис. 2.2). Для этого зададимся напряжением на входе U_1 , тогда действующее значение тока в цепи $I = U_1/(R_1 + R_2)$, действующее значение напряжения на выходе $U_2 = R_2 I = U_1 R_2 / (R_1 + R_2)$, коэффициент передачи $K = U_2/U_1 = R_2 / (R_1 + R_2)$.

В Г-образных четырехполюсниках коэффициент передачи равен отношению выходного сопротивления четырехполюсника R_2 к входному $R_1 + R_2$; $K = R_{\text{вых}}/R_{\text{вх}}$. Входным сопротивлением четырехполюсника называют сопротивление между входными, а выходным — между выходными зажимами цепи. Выражение $K = R_2/(R_1 + R_2)$ справедливо только для четырехполюсников вида рис. 2.2. Для четырехполюсников иного вида рассчитывать коэффициент передачи следует по общему правилу.

2. Вычислим коэффициент передачи K для мостовой цепи в режиме холостого хода на выходе, т. е. при разомкнутых вторичных зажимах (рис. 2.3).

Зададимся входным напряжением U_1 . В этом случае через резисторы R_1 и R_4 протекает ток $I_1 = U_1/(R_1 + R_4)$, а через R_2 и R_3 — ток $I_2 = U_1/(R_2 + R_3)$. Примем потенциал точки F за ну-

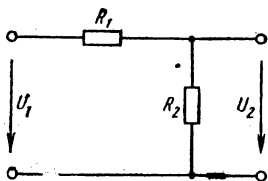


Рис. 2.2

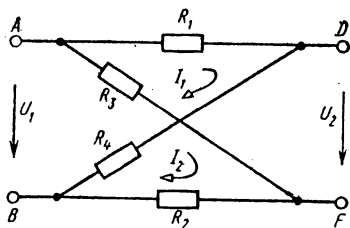


Рис. 2.3

левой. Если положительное направление тока такое, как показано на рис. 2.3, то потенциал точки A выше потенциала точки F на падение напряжения на резисторе R_3 (поскольку при указанном положительном направлении напряжения источника U_1 ток течет от точки A к точке F), т. е. $\varphi_A = R_3 I_2 = U_1 R_3 / (R_2 + R_3)$. Так как через резистор R_1 ток течет от точки A к точке D , то потенциал точки D ниже потенциала точки A на падение напряжения на резисторе R_1 , т. е.

$$\varphi_D = \varphi_A - R_1 I_1 = \frac{U_1 R_3}{R_2 + R_3} - \frac{U_1 R_1}{R_1 + R_4} = U_1 \left[\frac{R_3 R_4 - R_1 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)} \right].$$

$$\text{Выходное напряжение } U_2 = \varphi_D - \varphi_F = U_1 \left[\frac{R_3 R_4 - R_1 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)} \right].$$

Коэффициент передачи

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_3 R_4 - R_1 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)} \quad (2.1)$$

Из последнего выражения следует, что коэффициент передачи цепи зависит только от параметров цепи и не зависит от приложенного к ней напряжения.

Исследуем, каким образом изменяется коэффициент передачи данного четырехполюсника, если сопротивления R_1, R_2, R_4 постоянны, а сопротивление R_3 изменяется от 0 до ∞ . При $R_3 = 0$ $K(0) = -R_1/(R_1 + R_4)$. Если в выражение (2.1) подставим $R_3 = \infty$, то получим неопределенность вида $\frac{\infty}{\infty}$. Чтобы избавиться от неопре-

деленности, вынесем из числителя и знаменателя множитель R_3 :

$$K = \frac{R_4 - R_1 R_2 / R_3}{(1 + R_2 / R_3) (R_1 + R_4)}.$$

При $R_3 = \infty$ $K(\infty) = R_4 / (R_1 + R_4)$. Таким образом, в цепи рис. 2.3 при изменении R_3 от 0 до ∞ коэффициент передачи K изменяется от $-R_1 / (R_1 + R_4)$ до $R_4 / (R_1 + R_4)$ (рис. 2.4).

Определим R_3 , при котором $K = 0$. Очевидно, что $K = 0$, если $R_3 R_4 - R_1 R_2 = 0$, откуда $R_3 = R_1 R_2 / R_4$. При $\varphi_D = \varphi_F$ $U_2 = 0$. Следовательно, в данной цепи при $0 < R_3 < R_1 R_2 / R_4$ $K < 0$, т. е. полярность выходного напряжения противоположна

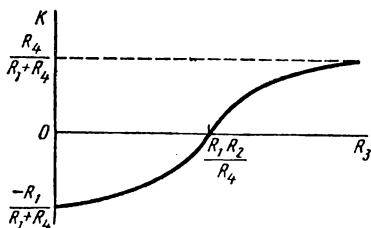


Рис. 2.4

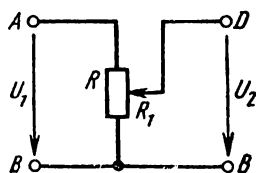


Рис. 2.5

полярности входного. При $R_1 R_2 / R_4 < R_3 < \infty$ $K > 0$, т. е. полярности входного и выходного напряжений одинаковы, а коэффициент передачи возрастает от 0 до $R_4 / (R_1 + R_4)$.

Делитель напряжения с плавной регулировкой. Исследуем коэффициент передачи делителя напряжения с плавной регулировкой (рис. 2.5). Делитель напряжения имеет три точки: входную (точка A), выходную (точка D) и общую (точка B). Входное напряжение подводят между точками AB, при этом по резистору R протекает ток, создающий на нём падение напряжения. Выходное напряжение U_2 снимается с той части резистора, которая заключена между движком и общей точкой делителя, т. е. с сопротивления R_1 . Очевидно, что чем меньше R_1 , т. е. чем ниже (по рис. 2.5) установлен движок, тем меньше напряжение на выходе делителя и наоборот. Если движок находится в нижнем положении, то сопротивление между движком и нижней точкой, а также выходное напряжение U_2 и коэффициент передачи K равны нулю. Если движок установлен в верхнее положение, то $U_2 = U_1$, $K = 1$. Таким образом, в делителях напряжения, собранных по схеме рис. 2.5, коэффициент передачи может плавно изменяться от 0 до 1. В реальных устройствах к выходным зажимам делителя подключают резистор. Сопротивление этого резистора является входным сопротивлением нагрузочного устройства, на вход которого подается напряжение, снимаемое с делителя. Определим зависимость коэффициента передачи плавного делителя напряжения, нагруженного на резистор сопротивлением R_H (рис. 2.6, а) в зависимости от угла поворота движка α , т. е. от отношения R_1 / R , если при $R_1 = R$ $\alpha = \alpha_{\max}$. Для удобства анализа представим делитель в виде Г-образного четырехполюсника (рис. 2.6, б). Так как у таких четырехполюсников коэффициент пе-

редачи равен отношению выходного сопротивления к входному, то

$$K = \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{\frac{R_1 R_H}{R_1 + R_H}}{R - R_1 + \frac{R_1 R_H}{R_1 + R_H}} = \frac{R_1 R_H}{R R_1 - R_1^2 - R R_H} =$$

$$= \frac{R_1}{R R_1 / R_H - R_1^2 / R_H + R}.$$

Если $R_H = \infty$ (режим холостого хода), то $K = R_1/R$. В этом случае коэффициент передачи пропорционален углу поворота (рис. 2.7). Если сопротивление R_H сравнимо с сопротивлением делителя R_1 ,

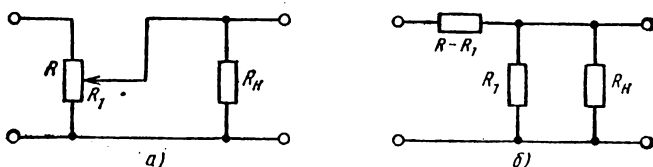


Рис. 2.6

то коэффициент передачи изменяется не пропорционально углу поворота. Происходит это потому, что выходное сопротивление делителя $(R_1 R_H)/(R_1 + R_H)$ при повороте движка растет медленнее, чем увеличивается сопротивление R_1 , выходное же напряжение и коэффициент передачи пропорциональны выходному сопротивлению делителя. Очевидно, что чем меньше сопротивление нагрузки, тем медленнее нарастает выходное сопротивление, поскольку общее выходное сопротивление R_1 и R_H (R_1 и R_H соединены параллельно) меньше меньшего сопротивления. Однако при $R_H = R$ $K = 1$ для любых значений $R_H \neq 0$. Поэтому при наличии резистора R_H выходное напряжение нарастает сначала медленно, а затем резко увеличивается. Аналогичный вывод вытекает из анализа выражения

$K = \frac{R_1}{R + R R_1 / R_H - R_1^2 / R_H}$. При $R_H = \infty$ $K = R_1/R$. При конечных значениях R_H K не $\sim \alpha$. Например, если $R_H = R$, то при установке движка в среднее положение $K = 0,4$. Для получения $K = 0,5$ угол поворота α должен быть равен $0,61\alpha_{\text{max}}$. Если $R_H = 0,5R$, то при установке движка в среднее положение $K = 0,33$. Для получения $K = 0,5$ необходим угол поворота $\alpha = 0,7\alpha_{\text{max}}$. Если $R_H = 0,1R$, то при установке движка в среднее положение $K = 0,14$. При этом для получения $K = 0,5$ угол поворота $\alpha = 0,9\alpha_{\text{max}}$ (рис. 2.8) и т. д.

Электронный осциллограф. Универсальным измерительным прибором, позволяющим наблюдать форму колебаний и измерять их размах, период и частоту, является электронно-лучевой осциллограф. На экран трубки осциллографа наносится сетка, содержащая деления по горизонтали и вертикали. По горизонтали деления градуируются в единицах времени (мс или мкс), а по вертикали — в единицах напряжения (В или мВ). Цена делений может наноситься либо непосредственно около соответствующих переключателей, либо определяться экспериментально с помощью калибровочных сигналов. С помощью осциллографа можно сравнивать положительные на-

правления токов в различных ветвях цепи. Делают это следующим образом. У осциллографа имеется два входных зажима — потенциальный и корпусный, причем потенциальный часто называют входным (определить экспериментально зажимы просто: если дотронуться пальцем до проводника, соединенного с корпусным зажимом, то на экране появится горизонтальная линия, а если до потенциального, то беспорядочные кривые).

Пусть имеется цепь, состоящая из нескольких резисторов, по которой протекают токи гармонической формы. Следовательно, на каждом резисторе падения напряжения имеют также гармоническую форму. Подключим осциллограф параллельно одному из резисторов. При этом на экране осциллографа появится кривая синусоидальной формы. Для удобства работы регулятор «Развертка»

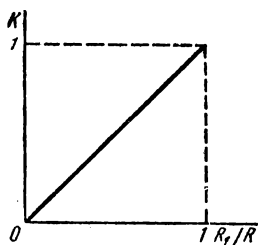


Рис. 2.7

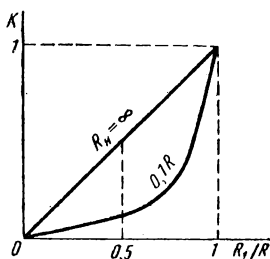


Рис. 2.8

следует установить в позицию, при которой на экране укладывается 2—3 периода синусоиды. Для большей устойчивости изображения лучше всего использовать внешнюю синхронизацию, регулятором « \leftrightarrow » переместить изображение вправо или влево таким образом, чтобы максимум синусоиды совпал с некоторой вертикальной линией сетки. За положительное направление тока в резисторе примем направление от точки, подключенной к потенциальному выводу осциллографа, к точке, подсоединенной к корпусному выводу. Примем данное направление тока за опорное, т. е. за то, с которым будем сравнивать направление токов в других ветвях или резисторах. Так как в резистивной цепи сдвиги фаз отсутствуют, то положительные направления токов в остальных резисторах могут или совпадать с опорным по направлению, или быть противоположными ему.

Подключим осциллограф к следующему резистору. Если на той же вертикали синусоида имеет максимум, то положительное направление тока такое же, как и в предыдущем случае, т. е. ток протекает от зажима резистора, подключенного к потенциальному выводу осциллографа, к зажиму, подсоединенному к корпусному выводу, если же синусоида имеет минимум, то наоборот. Зная положительные направления токов в резисторах, можно легко определить знаки падения напряжения на элементах: точка, от которой течет ток в резисторе, имеет знак плюс, а к которой течет — минус. Заметим, что если к цепи подключен источник напряжения с формой напряжения, отличной от синусоидальной (например, П-образный), то определение направления токов в элементах цепи и знаков напряжений на этих элементах аналогично рассмотренному. При измерениях в цепях, не содержащих электронных элементов (транзисторов, микросхем и т. д.), часто напряжения и токи выражают в

действующих значениях, но при работе с радиотехническими цепями требуется знать размах или амплитудное значение сигналов. Зная размах и форму напряжения, в большинстве случаев можно составить представление о его действующем значении, но, зная действующее значение (например, по показаниям стрелочного прибора), чаще всего нельзя вычислить ни максимальное значение, ни размах напряжения. Даже в цепях, состоящих из простых пассивных элементов, в ряде случаев определение действующего значения напряжения не позволит получить правильного представления о режиме работы цепи. Например, пробивное напряжение конденсатора (транзистора, микросхемы и др.) составляет $U_{пр}$. Однако нет уверенности, что при напряжении, действующее значение которого значительно меньше пробивного, конденсатор (транзистор, микросхема и др.) не окажется пробитым, поскольку пробой обусловлен не действующим значением напряжения, а его размахом. На практике для определения сопротивлений элементов, а также для настройки аппаратуры нужно знать форму сигнала, поскольку сигналы, имеющие различную форму, иногда даже незначительно отличающуюся друг от друга, могут изменить работу цепей. Основным недостатком измерений с помощью осциллографа состоит в меньшей точности по сравнению с измерениями, выполненными с помощью приборов стрелочного и тем более цифрового типа. Но так как многие детали и элементы, используемые в радиотехнических цепях, изготавливают с достаточно большими допусками, то точность, даваемая осциллографом, в большинстве случаев оказывается удовлетворительной. Осциллограф имеет два канала; вертикальный (канал Y) и горизонтальный (канал X). Каждый канал имеет свои входные зажимы — Вход Y и Вход X . Корпусные зажимы обоих каналов общие (эти точки внутри осциллографа соединены между собой). Если необходимо измерить только напряжение, а не период или частоту сигнала, то развертывающее устройство можно отключить. При этом луч на экране осциллографа перемещается только вверх—вниз и прочерчивает прямую линию, длина которой пропорциональна размаху напряжения, подведенного к входным зажимам осциллографа. На передней панели осциллографа имеются регуляторы следующих видов:

- 1) сетевой тумблер для подключения к сети питания;
- 2) регуляторы яркости, фокусировки, перемещения изображения вверх—вниз и вправо—влево по экрану;
- 3) регуляторы, изменяющие размеры изображения по вертикали и горизонтали;
- 4) регуляторы, изменяющие число периодов изображения, укладываемых на экране. Устройство, определяющее время, за которое луч перемещается по экрану, называют развертывающим или разверткой;
- 5) регуляторы, с помощью которых изображение на экране устанавливают неподвижным («Синхронизация»);
- 6) регуляторы, с помощью которых определяют цену деления клетки на экране осциллографа («Калибровка»).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать коэффициент передачи K и выходное напряжение U_2 , если $U_1 = 1$ В; $R_1 = 500$ Ом; $R_2 = 0,5 \div \div 5$ кОм. Построить кривые $K = f(R_2)$ для Г-образной цепи (рис. 2.2). Результаты расчетов занести в табл. 2.1.

2. Вычислить коэффициент передачи K и построить кривую $K = f(R_3)$ для мостовой цепи (рис. 2.3) при $R_3 = 0 \div 5$ кОм. Значения сопротивления R_1 , R_2 , R_4 задаются в соответствии с вариантом задания (например, $R_1 = 500$ Ом; $R_2 = 100$ Ом; $R_4 = 1$ кОм). Результаты расчетов занести в табл. 2.2.

3. Рассчитать и построить кривые $K = f(R_1/R)$ в цепи (рис. 2.6) для $R_{H1} = \infty$; $R_{H2} = 0,1R$. Результаты расчетов занести в табл. 2.3.

Задание. Измерить коэффициент передачи Г-образной цепи. Снять кривую $K = f(R_3)$ мостовой цепи. Получить зависимость коэффициента передачи плавного делителя напряжения от отношения R_1/R при двух значениях сопротивления нагрузки.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 2.9. Регуляторы генератора установить в позиции, при которых выходное сопротивление минимально, частота определяется номером стенда

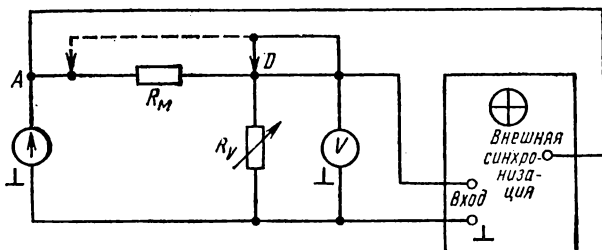


Рис. 2.9

(например, $R_{вых} = 5$ Ом; $f = 5$ кГц). Для большей устойчивости изображения следует использовать режим внешней синхронизации. Входной зажим измерительных приборов подключить к точке А. При этом вольтметр покажет действующее значение напряжения U_1 на входе делителя, а размах изображения на экране осциллографа будет пропорционален U_1 . Регулятор выходного напряжения генератора установить в такое положение, при котором вольтметр показывает напряжение, указанное в задании (например, 1 В), регуляторы осциллографа установить в такие позиции, при которых на экране укладывается 2—4 периода синусоидальной кривой, а размах изображения (рис. 2.10) занимает большую часть экрана, желательно с целым числом клеток.

2. Входной зажим приборов отключить от точки A и подключить к точке D . При этом будет измеряться выходное напряжение четырехполюсника. Так как в данном эксперименте $R_1 = R_2$, то $K = 0,5$. При этом показание вольтметра и размах изображения на осциллографе должны уменьшиться в два раза. Занести в табл. 2.1 показания вольтметра и указать число клеток, занимаемых изображением по вертикали.

3. Изменять R_2 от 50 Ом до 5 кОм, записать показания вольтметра и указать число клеток на экране осциллографа.

4. Собрать цепь по схеме рис. 2.11. Выбрать $R_3 = 5$ кОм. Регуляторы «вправо — влево» на осциллографе установить в такие положения, при которых максимум синусоиды совпадает с вертикальной осью на экране осциллографа. Отключить входной зажим осциллографа от точки D и подключить к входу четырехполюсника (к точке A). Убе-

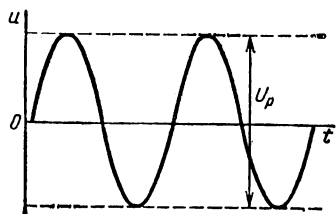


Рис. 2.10

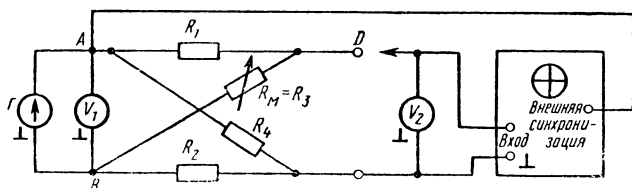


Рис. 2.11

диться, что размах изображения увеличивается, но максимум по-прежнему находится на прежней вертикальной оси (совпадение максимумов означает, что $K > 0$). Показания всех измерительных приборов занести в табл. 2.2. В последующих экспериментах поддерживать напряжение U_1 неизменным. Уменьшить сопротивление R_3 . При этом коэффициент передачи, а следовательно, входное напряжение, показание вольтметра V_2 , размах напряжения на осциллографе также уменьшатся. При $R_3 > R_1 R_2 / R_4$ $K > 0$ вертикальная линия осциллографа совпадает с максимумом кривой. При $R_3 = R_1 R_2 / R_4$ $K = 0$ (вольтметр показывает отсутствие напряжения), на экране осциллографа будет горизонтальная линия. При дальнейшем уменьшении

R_3 знак коэффициента передачи меняется на противоположный. Размах кривой на экране осциллографа снова увеличивается, но кривая сместится на $1/2$ периода, что экспериментально подтверждает изменение знака коэффициента передачи на противоположный. Так как вольтметр реагирует на модуль напряжения, то его показания от знака коэффициента передачи не зависят. Переключить входной зажим осциллографа с выхода на вход цепи (с точки D к точке A) и убедиться, что максимум входного напряжения находится по-прежнему в средней части экрана. Подключить входной зажим осциллографа к выходу цепи (точке D), уменьшить R_3 до нуля. Записать показания всех приборов в табл. 2.2.

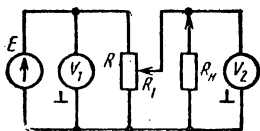


Рис. 2.12

5. Собрать цепь по схеме рис. 2.12. В качестве нагрузочного резистора R_n использовать магазин R_v . Установить на R_v сопротивление, близкое к $0,1R$. Верхний (по схеме)

зажим магазина сопротивлений отключить от движка, при этом делитель будет работать в режиме холостого хода. Движок делителя перевести в положение наибольшего сопротивления, т. е. повернуть до отказа по часовой стрелке. Регулятор выходного напряжения установить в такое положение, при котором вольтметр V_2 показывает 1 В. Во всех последующих экспериментах поддерживать это напряжение, постоянным. (Если бы приборы работали без погрешностей, то вольтметр V_2 показал бы также 1 В, поскольку при $R_1 = R$ $K = 1$ и $U_2 = U_1$. Но так как приборы имеют определенные погрешности, то показания вольтметров V_1 и V_2 могут несколько отличаться. Поэтому на V_1 следует во всех последующих экспериментах поддерживать такое напряжение, при котором $U_2 = 1$ В в случае $R_1 = R$.) Показание вольтметра V_2 занести в табл. 2.3. Дотронуться проводником, подключенным к свободному выводу резистора $R_n = R_v$, до выходного гнезда делителя. Так как при $R_1 = R$ независимо от сопротивления резистора R_n $K = 1$, то при подключении резистора R_v на выход делителя напряжение U_2 должно оставаться неизменным. Убедиться, что U_2 по-прежнему равно 1 В. Результаты измерений занести в табл. 2.3. Отключить вывод вольтметра V_2 от верхнего гнезда делителя.

6. Движок делителя установить в такое положение, при котором вольтметр V_2 покажет 0,9 В. Так как в режиме холостого хода $K = R_1/R$, то при $U_2 = 0,9$ В $R_1 = 0,9R$

или $R_1/R = 0,9$. Прикоснуться выводом нагрузочного резистора до выходного зажима делителя. Так как при этом ток во входной цепи, а следовательно, и падение напряжения на участке $R - R_1$ делителя увеличиваются, а входное напряжение остается неизменным, то выходное напряжение уменьшается. Показание прибора V_2 занести в табл. 2.3. Отключить вывод нагрузочного резистора. Аналогичным образом устанавливать делитель в такие позиции, при которых в режиме холостого хода $U_2 = (0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0)$ В, т. е. устанавливать $R_1/R = (0,8; 0,7, \dots, 0,2; 0,1; 0)$. В каждой позиции записывать U_2 при отключенной и подключенной нагрузке. Во всех позициях, кроме $R_1 = 0$, выходное напряжение при подключенном нагрузочном резисторе будет меньше, чем при отключенном R_n . Результаты измерений занести в табл. 2.3.

Таблица 2.1

$R_1 =$; $U_1 =$					
По предварительному расчету			Получено при эксперименте		Рассчитано по экспериментальным данным
R_2 , Ом	K	U_2 , В	U_2 , В	Размах изображения на осциллографе, дел	K

Таблица 2.2

$R_1 =$; $R_2 =$; $R_4 =$; $U_1 =$				
По предварительному расчету		Получено при эксперименте		Рассчитано по экспериментальным данным
R_3 , Ом	K	U_2 , В	Размах изображения на осциллографе, кл	K

Таблица 2.3

$U_1 =$; $R_H =$				$U_1 =$; $R_H = 0,1 R$			
По предвари- тельному расчету		Получено при эк- спери- менте	Рассчита- но по эк- спери- менталь- ным дан- ным	По предвари- тельному расчету		Получено при эк- спери- менте	Рассчита- но по эк- спери- менталь- ным дан- ным
$\alpha = R_1/R$	K	$U_2, В$	K	$\alpha = R_1/R$	K	$U_2, В$	K

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать коэффициенты передачи и построить соответствующие графики для всех произведенных экспериментов.

2. Сравнить результаты, полученные экспериментально, с аналогичными результатами, полученными при предварительном расчете.

3. Вычислить и построить по экспериментальным данным кривую $K = f(R_3)$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Рассчитайте коэффициент передачи K для цепи рис. 2.2.
2. Используя полученное выражение для K (рис. 2.3), постройте зависимость $K = f(R)$ при: а) $R_1 = \text{var}$; б) $R_2 = \text{var}$; в) $R_4 = \text{var}$.
3. При каком R_1/R значение ΔK будет наибольшим (исходные данные показаны на рис. 2.6 и 2.8)?
4. Определите U_2/E в цепи рис. 2.13 при замыкании ключа K , если: а) $R_i = 0$; б) $R_i > 0$.

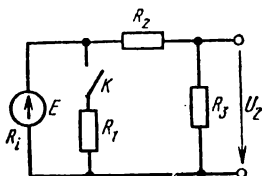


Рис. 2.13

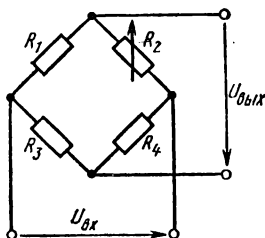


Рис. 2.14

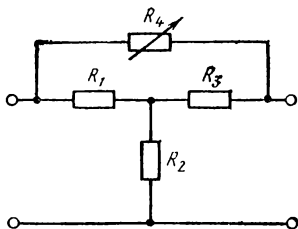


Рис. 2.15

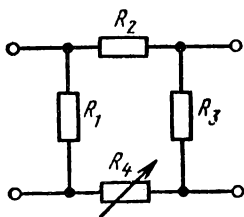


Рис. 2.16

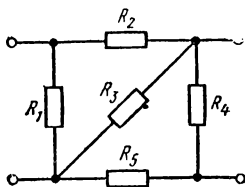


Рис. 2.17

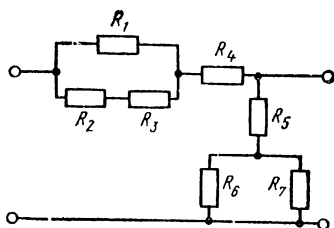


Рис. 2.18

5. Вычислите K в цепи рис 2.14 при $R_2 = 0 \div \infty$.
6. Найдите K и постройте соответствующие кривые для схем рис. 2.15, 2.16.
7. Рассчитайте K для цепей рис. 2.17 и 2.18.

Лабораторная работа № 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКОНОВ КИРХГОФА В РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЯХ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 1.4; 2) изучить описание данной лабораторной работы; 3) заготовить табл. 3.1 и 3.2; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментально убедиться в справедливости законов Кирхгофа для резистивных цепей, содержащих источники напряжения и тока.

В цепи, содержащей пассивные элементы и источники напряжения, необходимо определять столько токов, сколько ветвей имеет цепь. При этом по первому закону Кирхгофа следует составить $q - 1$ уравнений, где q — число узлов в цепи, а по второму закону — m уравнений, где m — число независимых контуров. В общем

случае при наличии источников переменного тока уравнения записывают только для мгновенных значений. Например, для цепи рис. 3.1 справедливыми являются выражения

$$\begin{aligned} i_1 - i_2 + i_3 &= 0; \\ (R_{i1} + R_1) i_1 + R_2 i_2 &= e_1; \\ R_2 i_2 + (R_{i3} + R_3) i_3 &= e_3. \end{aligned}$$

Если в цепи действуют только источники гармонической ЭДС одинаковой частоты, то уравнения электрического равновесия цепи можно записать в комплексной форме:

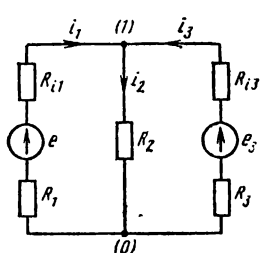


Рис. 3.1

$$\begin{aligned} \dot{i}_1 - \dot{i}_2 + \dot{i}_3 &= 0; \\ (R_{i1} + R_1) \dot{i}_1 + R_2 \dot{i}_2 &= \dot{E}_1; \\ R_2 \dot{i}_2 + (R_{i3} + R_3) \dot{i}_3 &= \dot{E}_3; \\ \dot{i}_1 e^{j\psi_{i1}} - \dot{i}_2 e^{j\psi_{i2}} + \dot{i}_3 e^{j\psi_{i3}} &= 0; \\ (R_{i1} + R_1) \dot{i}_1 e^{j\psi_{i1}} + R_2 \dot{i}_2 e^{j\psi_{i2}} &= E_1 e^{j\psi_{e1}}; \\ R_2 \dot{i}_2 e^{j\psi_{i2}} + (R_{i3} + R_3) \dot{i}_3 e^{j\psi_{i3}} &= E_3 e^{j\psi_{e3}}. \end{aligned}$$

В цепи, состоящей из чисто резистивных элементов, питаемых от гармонических источников с одинаковыми частотами и начальными фазами, аргументы всех откликов имеют одинаковые значения. Следовательно, в этом случае $\psi_{e1} = \psi_{e3} = \psi_{i1} = \psi_{i2} = \psi_{i3} = \psi$, множители $e^{j\psi}$ в правых и левых частях уравнений электрического равновесия сокращаются:

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 + I_3 &= 0; \\ (R_{i1} + R_1) I_1 + R_2 I_2 &= E_1; \\ R_2 I_2 + (R_{i3} + R_3) I_3 &= E_3. \end{aligned}$$

Умножая обе части этих уравнений на постоянный множитель $I_m/I = E_m/E = \sqrt{2}$, получаем

$$\begin{aligned} I_{m1} - I_{m2} + I_{m3} &= 0; \\ (R_{i1} + R_1) I_{m1} + R_2 I_{m2} &= E_{m1}; \\ R_2 I_{m2} + (R_{i3} + R_3) I_{m3} &= E_{m3}. \end{aligned}$$

Заметим, что в резистивных цепях действующие значения откликов оказываются такими же, какими они были бы при питании цепи от источника постоянного напряжения с ЭДС, равными соответственно E_1 , E_2 и E_3 , и одинаковыми или противоположными начальными фазами. В этом случае явления, происходящие в цепях переменного тока, по энергетическим свойствам схожи с явлениями, имеющими место в цепях постоянного тока. При составлении уравнений ЭДС и токов определяются следующим образом: ЭДС, положительные направления которых совпадают с выбранным направлением обхода по контуру, имеют знак плюс, а ЭДС, направления которых противоположны направлению обхода, — знак минус. Аналогично, со знаком плюс записывают падения напряжений, вызванные токами, положительные направления которых совпа-

дают с направлением обхода по контуру, и наоборот. Если после подстановки числовых значений и выполнения всех расчетов, значения некоторых токов отрицательны, то действительные направления этих токов противоположны выбранным. При выполнении экспериментов определять знаки ЭДС, токов и падений напряжений следует с помощью осциллографа в соответствии с методикой, рассмотренной в работе № 2.

Если в исследуемую цепь включить хотя бы один реактивный элемент или изменить соотношения между начальными фазами источников, то уравнения, составленные для действующих значений напряжений и токов, перестают быть справедливыми. В этом случае записывать уравнения можно либо для комплексных, либо для мгновенных значений.

Если в цепи имеются источники тока, то число неизвестных токов, а следовательно, и уравнений, которые необходимо составить для нахождения токов в данной цепи, уменьшается на число ветвей, в которые включены источники тока. Например, в цепи рис. 3.2 — три ветви, но в одной из них находится источник тока $j = J_m \cos(\omega t + \psi_j)$, поэтому ток этой ветви известен и определять требуется только два тока, для чего достаточно двух уравнений:

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 + J &= 0; \\ (R_{i1} + R_1) I_1 + R_2 I_2 &= E, \end{aligned}$$

откуда при указанной полярности источников

$$I_1 = \frac{E - R_2 J}{R_{i1} + R_1 + R_2}; \quad I_2 = \frac{E + J(R_{i1} + R_1)}{R_{i1} + R_1 + R_2}.$$

Легко видеть, что сопротивление R_3 в данные уравнения не входит, поскольку ток третьей ветви определяется источником j и не зависит от сопротивлений, включенных в данную ветвь.

В случае, когда необходимо рассчитать не только токи в ветвях, но и падения напряжения на источниках тока, число уравнений увеличивается на число ветвей, в которые включены источники тока. Общее число уравнений в этом случае становится равным числу уравнений, которое составляется в цепях с тем же числом ветвей при наличии в них источников напряжения. Например, для цепи рис. 3.2

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 + J &= 0; \\ (R_{i1} + R_1) I_1 + R_2 I_2 &= E; \\ R_2 I_2 + R_3 J &= U_J. \end{aligned}$$

В электрической цепи, состоящей из чисто резистивных элементов, активная мощность источников $P_{\text{ан}}$ равна активной мощности $P_{\text{ан}}$, рассеиваемой в нагрузке. Активная мощность источников напряжения гармонической формы $P_{\text{ан}} = EI = E_m I_m / 2$, где E , E_m , I , I_m — действующие или максимальные значения ЭДС и тока соответственно, причем, если положительное направление ЭДС совпадает с положительным направлением тока, протекающим через

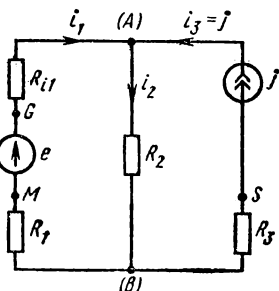


Рис. 3.2

источник, то мощность, создаваемая этим источником, является положительной, если противоположно ему, то отрицательной. Активная мощность источника тока

$$P_{\text{а ит}} = JU_{\text{ит}} = J_m U_{m \text{ ит}}/2,$$

где J , J_m , $U_{\text{ит}}$, $U_{m \text{ ит}}$ — действующие (максимальные) значения тока, текущего через источник, и напряжения на зажимах источника тока. Если направление напряжения совпадает с положительным направлением тока, то мощность такого источника положительна и наоборот. Активная мощность, рассеиваемая в нагрузке,

$$P_{\text{ан}} = I^2 R = I_m^2 R/2,$$

где I (I_m) — действующее значение тока, протекающего через нагрузку; R — сопротивление нагрузочного резистора. Так как в нагрузке электрическая энергия необратимо переходит в тепловую, то мощность $P_{\text{ан}} > 0$. Так как измерительная аппаратура обладает некоторой погрешностью, то при выполнении экспериментов мощности источников и нагрузок могут несколько отличаться, но эта разница не должна превышать нескольких процентов.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать действующие значения токов I_1 , I_2 , I_3 в цепи рис. 3.2. Значения внутреннего сопротивления источников напряжения R_{i1} берут по результатам измерений в работе № 1, а ЭДС E_1 и сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 — согласно варианту задания (например, $E_1 = 3$ В, $R_1 = 0,5$ кОм, $R_2 = 0,3$ кОм, $R_3 = 1$ кОм). Расчеты производить для случаев: а) резисторы R_1 — R_3 включены в цепь (цепь соответствует схеме рис. 3.2); б) закорочен резистор R_1 ; в) закорочен резистор R_2 ; г) закорочен резистор R_3 .

Результаты расчетов занести в табл. 3.1.

2. Определить действующие значения напряжений на участках AB , BM , BS , AS , AM , SM цепи рис. 3.2. Результаты расчетов занести в табл. 3.2.

3. Проверить выполнение баланса мощностей в цепи (табл. 3.2).

4. Произвести расчеты, аналогичные выполненным в п. 1—3, если положительное направление источника тока изменено на противоположное.

Задание. Экспериментально проверить справедливость законов Кирхгофа для разветвленных цепей.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 3.3 Регуляторы генератора установить в позиции, при которых выходное сопротивление минимально, а частота и напряжение определяются вариантом задания (например, 5 Ом; 5 кГц; 3 В). Отключить от цепи источник тока.

2. Экспериментально определить потенциальные и корпусные выводы у вольтметра и осциллографа.

3. Осциллограф и вольтметр подключить к точкам G и M (корпусным зажимом к точке M). Регуляторы осциллографа установить в позиции, при которых на экране укладываются 2—3 периода синусоиды с размахом в 6—8 клеток при устойчивом изображении. Напомним, что

размер изображения по вертикали изменяют регуляторами, находящимися в канале Y , по горизонтали — в канале X (этот регулятор имеется не во всех осциллографах) и блоке развертки, а устойчивость изображения — регуляторами, расположенными в блоке синхронизации. Заметить вертикальную линию сетки, совпадающую с максимумом осциллограммы. При выполнении данного измерения корпусный вывод осциллографа подключен к точке с меньшим потенциалом (точке M), а потенциальный — к точке с большим потенциалом (точке G), при этом на выбранной

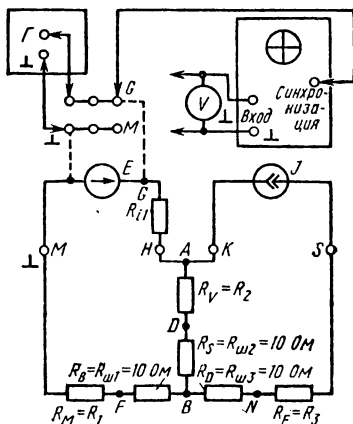


Рис. 3.3

вертикальную линию сетки, совпадающую с максимумом осциллограммы. При выполнении данного измерения корпусный вывод осциллографа подключен к точке с меньшим потенциалом (точке M), а потенциальный — к точке с большим потенциалом (точке G), при этом на выбранной

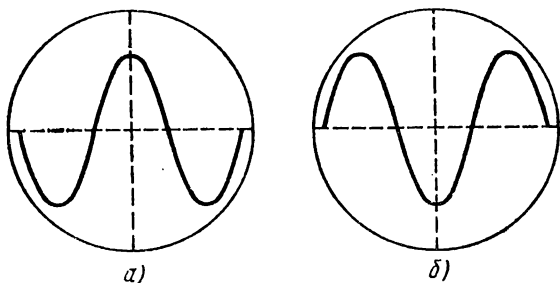


Рис. 3.4

вертикали оказывается максимум синусоиды. Так как цепь рис. 3.3 состоит только из резистивных элементов, то при измерении напряжений на любых элементах данной цепи изображение может иметь вид, показанный на рис. 3.4, а либо на рис. 3.4, б. Следовательно, если при измерениях падений напряжений на элементах цепи синусоиды

Таблица 3.1

Вид схемы	$E_{\text{теор}} = ; E_{\text{эксп}} = ; R_{11} = ; J = ; R_1 = ; R_2 = ; R_3 =$					
	Прямое включение источника тока			Обратное включение источника тока		
	По предварительному расчету		$\delta, \%$	Получено при эксперименте		$\delta, \%$
	$U_I, \text{ мВ}$	$I, \text{ мА}$		$U_I, \text{ мВ}$	$I, \text{ мА}$	
$\Pi \text{ при } R_{\text{ш}3} = 10 \text{ Ом}$ Для R_1, R_2, R_3 Для $R_1 = 0, R_2, R_3$ Для $R_1, R_2 = 0, R_3$ Для $R_1, R_2, R_3 = 0$						
$\Pi \text{ при } R_{\text{ш}3} = 10 \text{ Ом}$ Для R_1, R_2, R_3 Для $R_1 = 0, R_2, R_3$ Для $R_1, R_2 = 0, R_3$ Для $R_1, R_2, R_3 = 0$						
$\Pi \text{ при } R_{\text{ш}3} = 100 \text{ Ом}$ Для R_1, R_2, R_3 Для $R_1 = 0, R_2, R_3$ Для $R_1, R_2 = 0, R_3$ Для $R_1, R_2, R_3 = 0$						

соида на экране осциллографа получается такой, как показано на рис. 3.4, *a*, то потенциал точки, к которой подключен потенциальный вывод осциллографа, выше потенциала точки, к которой подсоединен корпусный вывод осциллографа, и наоборот. Ток в резисторе течет от точки с бóльшим потенциалом к точке с меньшим потенциалом. Все токи, направления которых совпадают с выбранным направлением обхода по контуру, записывают со знаком плюс, а противоположные — со знаком минус.

4. Подключить источник тока. Измерить падения напряжений на участках *AB*, *BM*, *BS*, *AS*, *AM*, *SM*. Результаты измерений занести в табл. 3.2.

5. Подключить корпусный вывод приборов к точке *B*, а потенциальный — к точке *F*, измерить падение напряжения на измерительном резисторе $R_{ш1}$. Так как напряжение на участке *BF* значительно меньше, чем на участке *BM*, то пределы измерений на осциллографе следует изменить для повышения их чувствительности. Заметим, что при этом регулировать на осциллографе можно только переключатели, находящиеся в усилителе вертикального канала (ка-

Таблица 3.2

Измеряемые параметры	$E_{1\text{теор}} =$; $E_{1\text{эксп}} =$; $R_{i1} =$; $J =$; $R_1 =$; $R_2 =$; $R_3 =$			
	Прямое включение источника тока		Обратное включение источника тока	
	По предва- рительному расчету	Получено при экспери- менте	По предва- рительному расчету	Получено при экспери- менте
U_{AB} , В				
U_{BN} , В				
U_{BS} , В				
U_{AS} , В				
U_{AM} , В				
U_{SM} , В				
P_U , Вт				
P_J , Вт				
ΣP , Вт				
P_H , Вт				
δ , %				

нала Y). Внешним проводником закорачивать поочередно резисторы R_1, R_2, R_3 . Убедиться, что изменение сопротивлений первой и второй ветвей изменяет ток в первой ветви, а в третьей — нет, поскольку ток в ней определяется источником тока и не зависит от сопротивления ветви, в которую этот источник включен. Результаты измерений занести в табл. 3.1.

6. Аналогичным образом измерить падения напряжения на $R_{ш2}$, поочередно закорачивая резисторы R_1, R_2, R_3 .

7. Измерить падение напряжения на $R_{ш3}$. Убедиться, что изменение сопротивлений резисторов R_1, R_2, R_3 не изменяет ток третьей ветви.

8. Изменить полярность источника тока на противоположную. Выполнить измерения, аналогичные произведенным в п. 4.—7.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать действующие значения токов ветвей, полученных экспериментально. Сравнить результаты, полученные теоретически, с аналогичными результатами, найденными экспериментально. Проверить выполнение первого закона Кирхгофа в каждом узле. Определить погрешности при измерении токов в цепи рис. 3.2 по формуле $\delta = \frac{I_{\text{теор}} - I_{\text{эксп}}}{I_{\text{теор}}} \cdot 100$, где δ — в %.

2. Проверить выполнение второго закона Кирхгофа в каждом контуре.

3. Сравнить активные мощности, отдаваемые источниками, с активными мощностями, потребляемыми резисторами. Рассчитать погрешность δ_p .

4. На основании полученных экспериментальных данных сделать вывод о зависимости токов в ветвях с источниками напряжений и источниками токов от сопротивлений ветвей.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений.

2. В каких случаях уравнения по законам Кирхгофа могут быть записаны в комплексном виде?

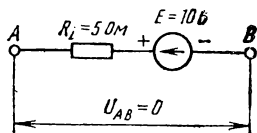


Рис. 3.5

3. Может ли на зажимах участка цепи (рис. 3.5) напряжение равняться нулю? Если может, то при каких условиях?

4. Какие особенности существуют при составлении уравнений по законам Кирхгофа при наличии в цепи источников тока?

5. Каким образом рассчитывают активную мощность, отдаваемую: а) источниками напряжения; б) источниками тока?
6. Как можно определить направление тока в цепи с помощью электронно-лучевого осциллографа?
7. Как изменятся токи в ветвях цепи рис. 3.2, если сопротивление резистора R_3 : а) уменьшить в два раза; б) увеличить в два раза?
8. Рассчитайте действующее значение напряжения между точками М и S в цепи рис. 3.3.
9. Замените в цепи рис. 3.2 источник напряжения эквивалентным источником тока. Определите токи I_1 , I_2 , I_3 для эквивалентной цепи, сравните с токами I_1 и I_2 , полученными для цепи рис. 3.2.
10. Почему при измерении напряжений с помощью осциллографа в цепи рис. 3.3 изображения на экране не могут сдвигаться на углы, отличные от 0 или 180°?
11. При каком значении E в цепи рис. 3.2 ток $I_1 = 0$?
12. Могут ли в цепи рис. 3.2 токи I_2 и I_3 быть равными нулю? Если не могут, то почему?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ RLC -ЦЕПИ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 2.4 и 2.5; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 4.1; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: научиться экспериментально определять действующие значения и начальные фазы токов и напряжений в RLC -цепи. Познакомиться с работой фазометра и его применением для измерения разности фаз между двумя гармоническими токами или напряжениями.

В общем случае при подключении к RLC -цепи источников с произвольной формой напряжения любые уравнения, описывающие процессы в данной цепи, могут быть составлены только для мгновенных значений токов и напряжений. Например, для цепи рис. 4.1 по законам Кирхгофа можно написать

$$\begin{aligned} -i_1 + i_2 + i_3 &= 0; \\ u_{R1} + u_L + u_{R2} &= e; \\ -u_{R2} - u_L + u_C + u_{R3} &= 0 \end{aligned}$$

или, выражая мгновенные значения напряжений через мгновенные значе-

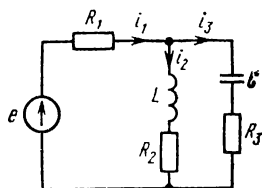


Рис. 4.1

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

$$R_1 i_1 + L \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = e;$$

$$-R_2 i_2 - L \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C} \int i_3 dt + R_3 i_3 = 0.$$

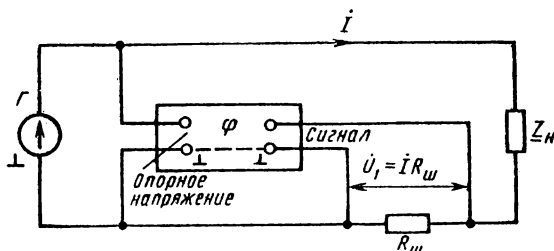


Рис. 4.2

Если ЭДС источника изменяется по периодическому гармоническому закону, то расчет цепи можно выполнять в комплексной форме. В этом случае уравнения приобретают вид

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0;$$

$$\underline{Z}_1 I_1 + \underline{Z}_2 I_2 = R_1 I_1 + j\omega L I_2 + R_2 I_2 = \underline{E};$$

$$-\underline{Z}_2 I_2 + \underline{Z}_3 I_3 = -R_2 I_2 - j\omega L I_2 + \frac{1}{j\omega C} I_3 + R_3 I_3 = 0.$$

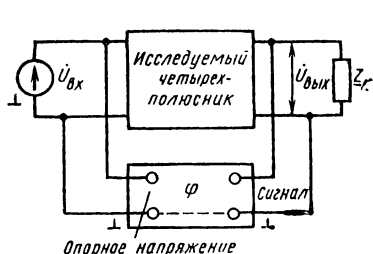


Рис. 4.3

Обозначим $\underline{\Delta} = \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3$. Решив данные уравнения, получим

$$I_1 = \underline{E} \{ \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 \} / \underline{\Delta};$$

$$I_2 = \underline{E} \underline{Z}_3 / \underline{\Delta}; \quad I_3 = \underline{E} \underline{Z}_2 / \underline{\Delta}.$$

Электронный фазометр.

Данное устройство представляет собой прибор, позволяющий измерять разность начальных фаз двух напряжений гармонической формы. Напряжение, относительно которого

изменяется сдвиг фаз, подводится к зажимам «Опорное напряжение» (т. е. известное), а напряжение, фазу которого необходимо измерить, — к зажимам «Сигнал».

Рассмотрим схему включения фазометра. Для измерения сдвига фаз между напряжением и током в двухполюснике необходимо собрать цепь (рис. 4.2). Ток I создает на резисторе $R_{ш}$ падение напряжения U_I , совпадающее по фазе с током I . Фазометр измеряет

сдвиг между напряжением \dot{U}_I (т. е. током \dot{I}) и входным напряжением \dot{U} , являющимся опорным. На фазометре имеется индикатор, указывающий характер исследуемой цепи — индуктивный или емкостный. Измерение разности фаз между входным и выходным напряжениями производят по схеме рис. 4.3.

К зажимам фазометра можно подводить напряжения от 0,1 до 10 В частотой от 0,05 до 50 кГц.

При сборке цепи следует следить за тем, чтобы корпусный зажим фазометра был соединен с корпусным зажимом генератора.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать комплексные действующие значения токов $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ и напряжений на каждом элементе, а также на участке DM (рис. 4.4), если $f = 5$ кГц; $R_1 = 0$; $R_{ш} = 100$ Ом, а остальные параметры элементов определяются вариантом задания. Результаты расчетов занести в табл. 4.1.

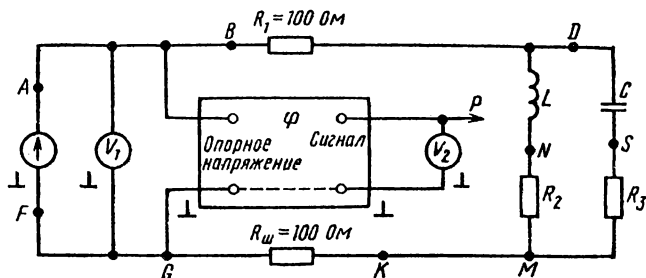


Рис. 4.4

2. Построить по рассчитанным данным векторную диаграмму токов и напряжений. Масштабы выбрать такими, при которых диаграмма будет иметь размер примерно 150×150 мм. Начертить диаграмму на миллиметровке, причем векторы напряжений нанести одним цветом, а векторы тока — другим.

3. Качественно (без выполнения расчетов) начертить примерную векторную диаграмму напряжений и токов для частоты в два раза меньшей.

Задание. Познакомиться с электронным фазометром, правилами его использования. Экспериментально измерить действующие значения и начальные фазы токов во всех ветвях и падений напряжений на всех элементах.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 4.4. Для удобства пояснения последующих экспериментов места соединений участков цепи обозначим буквами A, B, D, F, K, M, N, S . По-

сколько между точками A и B нет никаких элементов, их потенциалы одинаковые, но конструктивно эти точки находятся в разных местах панели, поэтому их удобно обозначить различными буквами. Буквой A обозначим выходной потенциальный зажим генератора, буквой B — вывод резистора R_1 , соединенный с выходной клеммой генератора (также относится к G , K , M). Регулятор выходного сопротивления генератора следует установить в положение минимального сопротивления (например, 5 Ом). Частота и выходное напряжение должны соответствовать полученным в предварительном расчете. Соединение между корпусными точками на фазометре, показанное пунктиром, имеется внутри фазометра. Результаты измерений занести в табл. 4.1.

2. Внешним проводником закоротить резистор $R_1 = 100$ Ом. Делается это потому, что в данном эксперименте функцию этого резистора выполняет измерительный резистор $R_{ш} = 100$ Ом. Потенциальный зажим «Сигнал» фазометра (а следовательно, и потенциальный зажим вольтметра V_2) подключить к точке K . Фазометр будет измерять разность фаз между напряжением на зажимах генератора и падением напряжения на резисторе $R_{ш}$, а следовательно, между напряжением \dot{U}_1 и током первой ветви \dot{I}_1 . Вольтметр V_2 показывает действующее значение напряжения на резисторе $R_{ш}$. Если принять начальную фазу напряжения на генераторе за нулевую, т. е. положить $\dot{U}_1 = U_1$, то комплексное значение тока в первой ветви будет $\frac{\dot{U}_2}{R_{ш}} e^{j\varphi}$, где φ — показание фазометра. Уменьшить частоту в два раза. Записать показания приборов. Установить исходную частоту.

3. Снять перемычку, замыкающую резистор R_1 , и закоротить резистор $R_{ш}$. Электрические параметры цепи остаются без изменений, но нижние (рис. 4.4) точки резисторов R_2 и R_3 окажутся соединенными с корпусом генератора. Перенести потенциальный вывод фазометра P из точки K в точку N . Вольтметр V_2 покажет действующее значение напряжения на резисторе R_2 , а фазометр — разность фаз между напряжением на выходе генератора \dot{U}_1 и током во второй ветви. Очевидно, что $\dot{I}_2 = \frac{U_{R_2}}{R_2} e^{j\varphi_{12}}$; $\dot{U}_{R_2} = U_{R_2} e^{j\varphi_{12}}$. Записать показания приборов на частотах f и $0,5f$. Установить частоту f .

4. Перенести потенциальный вывод P из точки N в точку S . Аналогичным образом измерить комплексные дейст-

вующие значения напряжения $\dot{U}_{R_3} = \dot{U}_{R_3} e^{j\varphi_3}$ и тока $\dot{I}_3 = \frac{U_{R_3}}{R_3} e^{j\varphi_3}$.

5. Перенести потенциальный вывод из точки S в точку D . При этом будет измерено комплексное действующее значение напряжения на участке DM : $\dot{U}_{DM} = U_{DM} e^{j\varphi} U_{DM}$. Записать показания приборов для частот f и $0,5f$.

6. Измерить комплексные действующие значения напряжения на индуктивной катушке L и конденсаторе C . Для этого необходимо один зажим катушки и конденсатор соединить с корпусом генератора таким образом, чтобы электрические параметры цепи остались без изменений. При этом резистор R_2 и катушку L , а также R_3 и C следует поменять местами. Цепь после таких перестановок принимает вид,

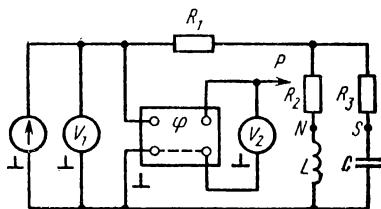


Рис. 4.5

Таблица 4.1

Измеряемые величины	$U_1 =$; $f =$; $R_1 = R_{ш} = 100 \text{ Ом}$; $R_2 =$; $R_3 =$; $L =$; $C =$					
	При частоте f				При частоте $0,5 f$	
	по предварительному расчету	получено при эксперименте	рассчитано по экспериментальным данным	$\delta, \%$	получено при эксперименте	рассчитано по экспериментальным данным
$I_1, \text{ мА}$						
$I_2, \text{ мА}$						
$I_3, \text{ мА}$						
$U_{R_1} (U_{R_{ш}}), \text{ В}$						
$U_{R_2}, \text{ В}$						
$U_{R_3}, \text{ В}$						
$U_L, \text{ В}$						
$U_C, \text{ В}$						
$U_{DM}, \text{ В}$						

показанный на рис. 4.5. Подключить потенциальный вывод фазометра P поочередно к точкам N и S . В первом случае будем измерять комплексное напряжение на индуктивной катушке L , во втором — на конденсаторе C :

$$\dot{U}_L = U_L e^{i\varphi_{UL}}; \dot{U}_C = U_C e^{i\varphi_{UC}}.$$

Измерения произвести на частотах f и $0,5f$.

Обработка результатов измерений

1. Зная модули и аргументы токов в ветвях и напряжений на элементах, записать выражения для расчетов комплексных действующих значений токов \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I}_3 и напряжений \dot{U}_1 , $\dot{U}_{R_1} = \dot{U}_{R_{ш}}$, \dot{U}_{R_2} , \dot{U}_{R_3} , \dot{U}_L , \dot{U}_C .

2. Записать мгновенные значения всех величин, рассчитанных в п. 1.

3. Сравнить сумму действующих значений токов $I_2 + I_3$ со значением I_1 и убедиться в их неравенстве. Сопоставить аналогичные величины, полученные в работе № 3. Объяснить, почему в цепях, рассмотренных в предыдущей работе, алгебраическая сумма модулей токов в каждом узле равнялась нулю, а в данной она отлична от нуля. Сравнить аналогичные комплексные величины \dot{I}_1 и $\dot{I}_2 + \dot{I}_3$. Объяснить, почему для модулей токов в RLC -цепях первый закон Кирхгофа несправедлив, а для комплексных действующих значений токов — справедлив. Сравнить мгновенные токи i_1 и $i_2 + i_3$.

4. Сравнить модули и комплексные действующие значения напряжения между точками DM и напряжениями на катушке L и резисторе R_2 , а также — между напряжением на конденсаторе C и резисторе R_3 (см. рис. 4.4).

5. Сравнить сумму модулей и комплексов для напряжений на генераторе и на элементах R_1 , L , R_2 или R_1 , C , R_3 .

6. Сравнить погрешности, возникающие во время эксперимента, с погрешностями, полученными при предварительном расчете.

7. Записать комплексные действующие значения напряжений и токов при частоте $0,5f$; сравнить с аналогичными величинами, полученными при частоте f .

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Составьте уравнения состояния цепи рис. 4.5 для: а) мгновенных значений; б) комплексных значений.

2. Начертите схему включения фазометра для измерения начальных фаз между: а) входными напряжением и током; б) входными и выходными напряжениями; в) между токами во второй и

третьей ветвях; г) между напряжением на индуктивной катушке L и током через конденсатор C .

3. В каких пределах изменяется разность фаз между входным напряжением и током, если $\omega = 1000 \text{ с}^{-1}$; $L = 0,5 \text{ Гн}$; $R = 100\text{--}2500 \text{ Ом}$ в цепи: а) рис. 4.6; б) рис. 4.7?

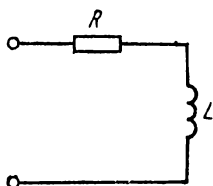


Рис. 4.6

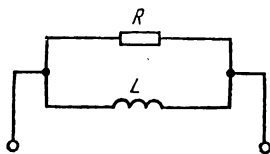


Рис. 4.7

4. Для цепи рис. 4.8 $f = 5 \text{ кГц}$; $L = 15,9 \text{ мГн}$; $R_1 = R_2 = 50 \text{ Ом}$. Определите U_2/U_1 .

5. В цепи рис. 4.6 $R = 1 \text{ кОм}$; $L = 0,1 \text{ Гн}$; $f = 2757 \text{ Гц}$. Рассчитайте R и L цепи рис. 4.7, если входные характеристики обеих цепей одинаковые.

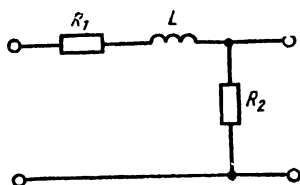


Рис. 4.8

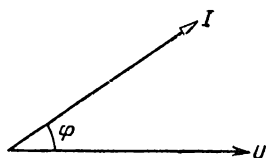


Рис. 4.9

6. Вычислите элементы схемы замещения цепи, векторная диаграмма которой показана на рис. 4.9, если $U = 45 \text{ В}$; $I = 5 \text{ А}$, $\varphi = 60^\circ$; $f = 500 \text{ Гц}$.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ СО ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЕ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 2.7; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 5.1—5.3; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Цель работы: научиться экспериментально измерять взаимную индуктивность и коэффициент связи между двумя катушками, а также изменять значения сопротивлений с помощью трансформатора.

Если две катушки изготовлены таким образом, что магнитный поток одной пересекает витки другой, то между катушками имеет-ся взаимная индуктивность M . При согласном соединении магнит-ный поток, вызванный током одной катушки, совпадает по направ-лению с магнитным потоком, вызванным током другой катушки ($M > 0$). Соединение катушек, при котором потоки направлены в противоположные стороны, является встречным ($M < 0$). Чтобы экспериментально определить коэффициент взаимной индуктивно-сти между катушками, необходимо измерить индуктивность при по-следовательном и встречном согласном включении катушек. При согласном включении $L_{\text{эк. согл}} = L_1 + L_2 + 2M$, при встречном — $L_{\text{эк. встр}} = L_1 + L_2 - 2M$. Зная $L_{\text{эк. согл}}$, $L_{\text{эк. встр}}$, можно рассчи-тать $M = (L_{\text{согл}} - L_{\text{встр}})/4$. Определить взаимную индуктивность M можно и из эксперимента с катушками, соединенными параллель-но. Так как $L_{\text{эк пар}} = \frac{L_1 - L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \mp 2M}$, то при согласном включе-нии катушек

$$M = L_{\text{эк. согл}} - \sqrt{L_{\text{эк. согл}}^2 + L_1 L_2 - L_{\text{эк. согл}} (L_1 + L_2)},$$

а при встречном

$$M = -L_{\text{эк. встр}} + \sqrt{L_{\text{эк. встр}}^2 + L_1 L_2 - L_{\text{эк. встр}} (L_1 + L_2)}.$$

Точность измерений при параллельном соединении катушек ниже, так как расчетная формула содержит разность двух близких по значению величин. Поэтому на практике определяют M путем ис-следования катушек, соединенных последовательно. Коэффициент свя-зи $K_M = M/\sqrt{L_1 L_2}$, откуда $M = K_M \sqrt{L_1 L_2}$. Для одинаковых кату-шек $K_M = M/L$ или $M = K_M L$. Ко-эффициент рассеяния $\sigma = 1 - K_M^2$. Для одинаковых катушек коэффици-ент связи K_M показывает, какая

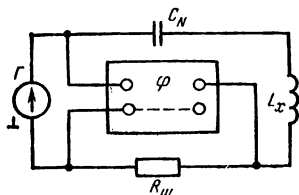


Рис. 5.1

часть магнитного потока одной ка-тушки сцепляется с витками другой. Взаимная индуктивность M и коэффициент связи K_M являются основными величинами, харак-теризующими катушки со взаимной индуктивностью. Из приведен-ных формул видно, что экспериментальное определение M и K_M сводится к измерению различных индуктивностей катушек с после-дующими расчетами. Проанализируем несколько способов измере-ния индуктивностей катушек.

Индуктивности катушек можно измерять с помощью мостов переменного тока. Однако такие приборы достаточно сложные, громоздки и в комплект лабораторного оборудования не входят. Ин-дуктивности можно измерять и с помощью трех вольтметров. Этот способ неудобен и недостаточно точен. Достаточно просто и точно можно измерить индуктивности с помощью устройства, показан-ного на рис. 5.1, состоящего из генератора Γ с переменной частотой, конденсатора с известной емкостью C_N , измерительного резистора $R_{\text{ш}}$, электронного фазометра φ и индуктивной катушки L_x .

На генераторе устанавливают некоторую частоту и такое выходное напряжение, при котором на зажимах «Сигнал» фазометра получают напряжение, необходимое для устойчивой работы. В общем случае фазометр покажет некоторый угол, определяемый частотой и сопротивлениями цепи, поскольку эту частоту генератора следует изменять таким образом, чтобы показания фазометра стали равными нулю (реактивная составляющая входного сопротивления равна нулю). В этом случае $\omega L_x - \frac{1}{\omega C_N} = 0$, откуда $L_x = \frac{1}{(2\pi f)^2 C_N}$.

Измерение будет тем точнее, чем меньше резистивная составляющая сопротивления контура по сравнению с реактивной. Поэтому выходное сопротивление на генераторе следует выбирать минимальным (например, 5 Ом), измерительное сопротивление — порядка 1—10 Ом. Если при изменении частоты разность фаз в районе нуля градусов изменяется незначительно («тупая настройка»), то резистивная составляющая сопротивления велика, приращение разности фаз небольшое. В этом случае емкость C_N следует уменьшить. Частота, при которой $\varphi_{Z_{вх}} = 0$, возрастет и настройка станет более острой.

С помощью трансформаторов можно преобразовать напряжения, токи и сопротивления. Если индуктивности обмоток трансформатора достаточно велики, а коэффициент связи близок к единице, то коэффициент трансформации $n = N_2/N_1$. Тогда

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2/n; \quad \dot{I}_1 = n\dot{I}_2; \quad Z_{вх} = \dot{U}_1/\dot{I}_1 = \dot{U}_2/(n\dot{I}_2) = \\ &= Z_H/n^2 = (N_1/N_2)^2 Z_H = (\dot{U}_1/\dot{U}_2)^2 Z_H. \end{aligned}$$

Следовательно, входное сопротивление трансформатора, нагруженного на Z_H , имеет такой же характер, что и сопротивление нагрузки, а модуль входного сопротивления близок к значению, отличающемуся от Z_H в $(U_1/U_2)^2$ раз, где U_1 , U_2 — действующие значения напряжений на входе и выходе трансформатора в режиме холостого хода. Данное равенство выполняется тем точнее, чем больше индуктивности, меньше сопротивления потерь обмоток и потоки рассеяния катушек.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать показания прибора U_I в цепи рис. 5.2, если $U_1 = 5$ В; $f = 5$ кГц; $R_{ш} = 10$ Ом; $N_1/N_2 = 1/1, 2/1, 3/1, 5/1, 10/1$; значение R_H выбирают в соответствии с вариантом задания (например, 10, 20 и 40 Ом).

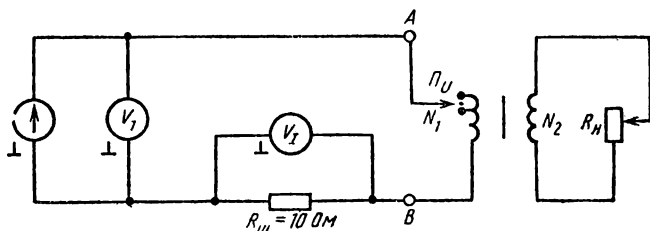


Рис. 5.2

Примечание. Если при $R_{ш} = 10$ Ом показание прибора $V_I < 50$ мВ, то $R_{ш}$ следует изменить на 100 Ом.

Задание. Экспериментально измерить взаимную индуктивность M и коэффициент связи K между двумя катушками. Измерить коэффициент трансформации трансформатора с различным числом витков в обмотках в режиме холостого хода. Произвести преобразование сопротивлений резистивных двухполюсников с помощью трансформатора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 5.1. Зная C_N , измерить индуктивность $L_3 = L_x^*$ (при разомкнутых зажимах L_4), а затем $L_4 = L_x$ (при разомкнутых зажимах L_3). Результаты измерений занести в табл. 5.1.

2. Определить одноименные зажимы катушек L_3 и L_4 , т. е. произвести разметку их выводов. Для этого катушки соединяют последовательно и измеряют результирующую индуктивность, а затем выводы одной катушки меняют местами и снова измеряют получившуюся индуктивность. В том случае, когда индуктивность оказывается большей, соединение будет согласным, а когда меньшей — встречным. Измерить индуктивность катушек $L_x = L_{\text{посл. согл}}$ и $L_x = L_{\text{посл. встр.}}$.

3. Зная разметку выводов, соединить катушки параллельно согласно и измерить результирующую индуктивность $L_x = L_{\text{пар. согл.}}$.

4. Соединить катушки параллельно встречно, измерить индуктивность $L_x = L_{\text{пар. встр.}}$.

5. Собрать цепь согласно рис. 5.2. Экспериментально измерить коэффициент трансформации трансформатора при различных положениях переключателя $П_U$, изменяя частоту от 2 до 10 кГц, а напряжение от 1 до 5 В. Убедиться, что коэффициент трансформации в широких пределах не зависит ни от частоты, ни от напряжения, что свидетельствует о достаточно больших индуктивностях обмоток, малых потоков рассеяния и малых резистивных составляющих сопротивлений катушек.

6. Установить напряжение U_1 , сопротивление $R_{ш}$, для которых производился предварительный расчет, выбрать частоту в пределах 5—10 кГц. Занести в табл. 5.2 показания приборов для различных значений коэффициента передачи трансформатора и сопротивлений нагрузки.

* В качестве L_x могут быть включены L_3 , L_4 .

Таблица 5.1

Вид схемы	$C_N = C_1 =$	
	Измерено f , кГц	Рассчитано по экспериментальным данным L , мГн
L_3		
L_4		
$L_{\text{посл. согл}}$		
$L_{\text{посл. встр}}$		
$L_{\text{пар. согл}}$		
$L_{\text{пар. встр}}$		

Таблица 5.2

Параметр	$R_{\text{ш}} = \quad , U_1 =$							
$R_{\text{ш}}, \text{ Ом}$								
N_1/N_2	2	3	5	10	2	3	5	10
$U_I, \text{ мВ}$								
$R_{\text{вх}}, \text{ Ом}$								

Таблица 5.3

Вид соединения	$L_{\text{согл}}, \text{ мГн}$	$L_{\text{встр}}, \text{ мГн}$	$M, \text{ мГн}$	K
Последовательное				
Параллельное				

Обработка результатов измерений

1. По экспериментальным данным рассчитать измеренные индуктивности катушек. Результаты расчетов занести в табл. 5.1.

2. Зная $L_{\text{согл}}$ и $L_{\text{встр}}$, определить M и K_M для всех произведенных экспериментов. Результаты расчетов занести в табл. 5.2.

3. Вычислить входные сопротивления нагруженного трансформатора для всех приведенных экспериментов. Результаты расчетов занести в табл. 5.3.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что понимают под взаимной индуктивностью M ? Какие способы определения взаимной индуктивности вы знаете?
2. Почему индуктивность L отрицательной быть не может, а взаимная индуктивность M может?
3. Для чего необходим фазометр при измерении взаимной индуктивности между двумя катушками?
4. Каков физический смысл коэффициента связи K_M при включении в цепь катушек с одинаковыми индуктивностями?

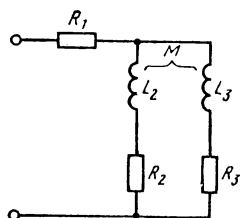


Рис. 5.3

5. При последовательном соединении катушек индуктивностью в 30 мГн каждая результирующие индуктивности оказались 100 и 20 мГн. Рассчитайте M и K_M .
6. При параллельном согласном соединении тех же катушек результирующая индуктивность оказалась 25 мГн. Определите M и K_M .
7. При параллельном встречном соединении тех же катушек индуктивность оказалась 5 мГн. Вычислите M , K_M и коэффициент рассеяния σ .
8. Рассчитайте комплексное входное сопротивление цепи (рис. 5.3) при согласном и встречном соединении катушек.
9. Докажите, что при последовательном соединении двух катушек при наличии взаимной индуктивности M между ними $L_{\text{эк. согл}} = L_1 + L_2 \pm 2M$.
10. Докажите, что при параллельном соединении двух катушек со взаимной индуктивностью M между ними $L_{\text{эк. пар}} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \mp 2M}$.
11. Что такое вариометр?
12. Докажите, что входное сопротивление нагруженного трансформатора $Z_{\text{вх}} = (N_1/N_2)^2 Z_{\text{н}}$.
13. Внутреннее сопротивление источника 4800 Ом, сопротивление нагрузки 3 Ом. Каким должен быть коэффициент трансформации, чтобы в нагрузке выделилась наибольшая мощность?

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНЫХ И ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОСТЕЙШИХ ЦЕПЕЙ

При подготовке к выполнению работы необходимо:

- 1) прочесть по учебнику [1] § 3.1;
- 2) изучить описание данной работы;
- 3) заготовить табл. 6.1—6.3;
- 4) выполнить предварительный расчет;
- 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: исследовать входные и передаточные характеристики цепей с одним реактивным элементом; научиться определять диапазоны частот, в которых входное сопротивление $RL(RC)$ -цепи имеет практически чисто резистивный или чисто реактивный характер.

Электрические цепи с двумя зажимами называют *двухполюсниками*, а с четырьмя (двумя входными и двумя выходными) — *четырёхполюсниками*. Каждый двухполюсник характеризуется комплексным входным сопротивлением, представляющим собой отношение комплексного входного напряжения $\dot{U}_{\text{вх}}$ к комплексному входному току $\dot{I}_{\text{вх}}$: $\underline{Z}_{\text{вх}} = \dot{U}_{\text{вх}}/\dot{I}_{\text{вх}} = Z_{\text{вх}}e^{j\varphi_{Z_{\text{вх}}}}$. При изменении частоты сопротивления реактивных элементов цепи изменяются, поэтому и модуль и аргумент комплексного входного сопротивления двухполюсника, содержащего реактивные элементы, оказываются величинами переменными, зависящими от частоты. Зависимость модуля комплексного входного сопротивления цепи от частоты называют *входной амплитудно-частотной характеристикой цепи* (АЧХ): $\underline{Z}_{\text{вх}} = Z_{\text{вх}}(\omega)$. Аналогично, *входной фазочастотной характеристикой цепи* называют зависимость аргумента комплексного входного сопротивления от частоты $\varphi_{\underline{Z}_{\text{вх}}} = \varphi(\omega)$. При анализе

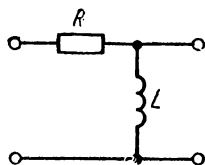


Рис. 6.1

простых цепей (не содержащих катушек со взаимными индуктивностями, зависимых источников, нелинейных элементов и т. д.) комплексное входное сопротивление можно записать непосредственно по виду схемы. В общем случае при определении входных характеристик необходимо задаться произвольным напряжением на входе, составить уравнения, связывающие напряжения и токи в ветвях цепи (например, по закону Кирхгофа или любыми другими методами, пригодными для расчета данной цепи), решить получившуюся систему уравнений относительно входного тока и рассчитать отношение $\dot{U}_{\text{вх}}/\dot{I}_{\text{вх}}$.

Комплексное входное сопротивление цепи можно представить не только в показательной $\underline{Z}_{\text{вх}} = Z_{\text{вх}}e^{j\varphi_{Z_{\text{вх}}}}$, но и в алгебраической форме $\underline{Z}_{\text{вх}} = r_{\text{вх}} + jx_{\text{вх}}$, где $r_{\text{вх}}$, $x_{\text{вх}}$ — резистивная и реактивная составляющие комплексного входного сопротивления. Частоту $\omega_{\text{гр}}$, на которой реактивная составляющая входного сопротивления цепи по абсолютному значению равна резистивной составляющей, называют *граничной*. Очевидно, что в RL -цепи (рис. 6.1) $\omega_{\text{гр}} = R/L$ [$f_{\text{гр}} = R/(2\pi L)$], а в RC -цепи $\omega_{\text{гр}} = 1/(RC)$. Граничная частота представляет собой величину обратную постоянной времени цепи τ . Так как $\tau_L = L/R$, а $\tau_C = RC$, то $\omega_{\text{гр}} = 1/\tau$. Например, для RL -цепи

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{\text{вх}} &= R + j\omega L = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} e^{j \arctg \frac{\omega L}{R}} = \\ &= R \sqrt{1 + (\omega/\omega_{\text{гр}})^2} e^{j \arctg (\omega/\omega_{\text{гр}})}.\end{aligned}$$

Следовательно, входную АЧХ последовательной RL -цепи вычисляют согласно выражению $Z_{вх}(\omega) = R \sqrt{1 + (\omega/\omega_{гр})^2}$, а входную фазочастотную характеристику — из выражения $\varphi_{Z_{вх}}(\omega) = \arctg(\omega/\omega_{гр})$. При $\omega = 0$ $Z_{вх} = R$; $\varphi_{Z_{вх}} = 0$; при $\omega = \omega_{гр}$ $Z_{вх} = R \sqrt{2}$, $\varphi_{Z_{вх}} = 45^\circ$, при $\omega = \infty$ $Z_{вх} = \infty$; $\varphi_{Z_{вх}} = 90^\circ$. Кривые $Z_{вх} = f(\omega)$ и $\varphi_{Z_{вх}} = f(\omega)$ RL -цепи показаны на рис.

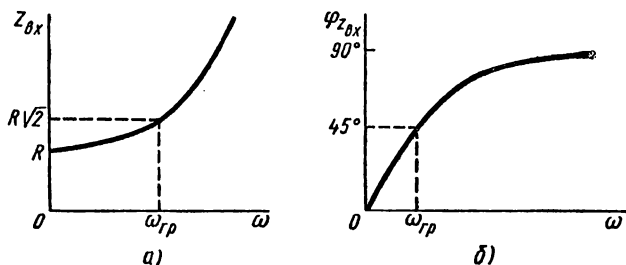


Рис. 6.2

6.2, а, б. Комплексная передаточная функция цепи по напряжению $K(j\omega)$ представляет собой отношение комплексных выходного \dot{U}_2 и входного \dot{U}_1 напряжений четырехполюсника:

$$\underline{K}(\omega) = \dot{U}_2(\omega)/\dot{U}_1 = K(\omega) e^{j\psi_K(\omega)},$$

причем выражение $K(\omega) = U_2(\omega)/U_1$ является передаточной АЧХ, а $\psi_K(\omega)$ — передаточной ФЧХ цепи. Чтобы рассчитать комплексную передаточную характеристику линейной цепи, необходимо

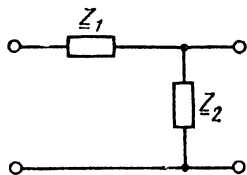


Рис. 6.3

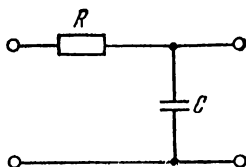


Рис. 6.4

проделать следующее: задаться произвольным входным напряжением \dot{U}_1 , любым методом вычислить комплексное выходное напряжение \dot{U}_2 и отношение \dot{U}_2/\dot{U}_1 . Входные и передаточные характеристики линейных цепей определяются только параметрами элементов цепи и схемой их соединений и не зависят от приложенного напряжения. В цепях вида рис. 6.3 передаточную функцию можно записывать, основываясь на виде схемы: $\underline{K} = \underline{Z}_2/(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)$. Например, в цепи рис. 6.4

$$\underline{K} = \frac{1/(j\omega C)}{R + 1/(j\omega C)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j(\omega/\omega_{гр})},$$

откуда передаточная АЧХ $K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_{rp})^2}}$, а ФЧХ $\psi_K(\omega) = -\arctg(\omega/\omega_{rp})$ (рис. 6.5, а, б).

Для качественного построения частотных характеристик необходимо прежде всего начертить эквивалентные схемы исследуемой цепи на нулевой и бесконечно большой частотах, имея в виду, что при $\omega = 0$ $X_L = \omega L = 0$; $|X_C| = 1/\omega C = \infty$, а при $\omega = \infty$

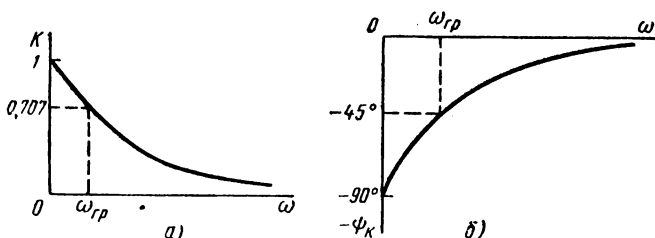


Рис. 6.5

$X_L = \infty$; $X_C = 0$, после чего определить значения всех характеристик на этих частотах. В любой неразветвленной цепи с одним реактивным элементом на граничной частоте $Z_{вх} = R\sqrt{2}$ (рис. 6.6, а); $|\varphi_{Z_{вх}}| = 45^\circ$ (рис. 6.6, б) $K = 0,707$; $|\psi_K| = 45^\circ$. Например, на нулевой частоте цепь рис. 6.4 приобретает вид рис. 6.7, а, а на

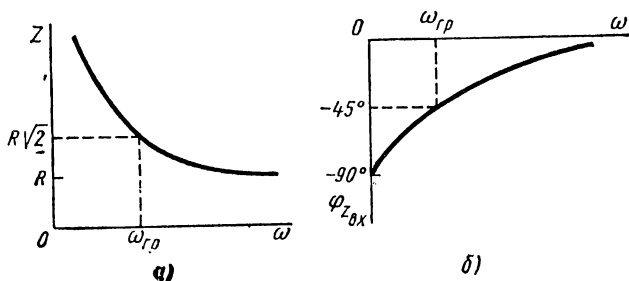


Рис. 6.6

бесконечно большой частоте — рис. 6.7, б. Как видно из схемы рис. 6.7, а, при $\omega = 0$ $Z_{вх} = \infty$, $\varphi_{Z_{вх}} = \arctg(X_C/R) = \arctg \infty \times (-\infty/R) = -90^\circ$, $I_{вх} = 0$; $U_R = 0$, следовательно, $U_2 = U_1$, а $K = U_2/U_1 = 1$. При $\omega = \infty$ (рис. 6.7, б) $Z_{вх} = R$; $\varphi_{Z_{вх}} = 0$; $U_2 = 0$ (поскольку $X_C = 0$), $K = 0$, следовательно, значения входной АЧХ цепи изменяются от ∞ до R , а входной ФЧХ — от -90 до 0° , а передаточный АЧХ — от 1 до 0 (см. рис. 6.5 и 6.6). Для построения передаточной ФЧХ ψ_K необходимо построить: 1) входную ФЧХ $\varphi_{Z_{вх}}$; 2) кривую разности начальных фаз входного напряже-

ния и входного тока, если $\psi_u = 0$; при этом следует иметь в виду, что так как $I e^{j\varphi_{i_{\text{вх}}}} = U/Z e^{j\varphi_{Z_{\text{вх}}}}$, то $\varphi_{i_{\text{вх}}} = -\varphi_{Z_{\text{вх}}}$; 3) зависимость сдвига фазы $\Delta\varphi = f(\omega)$ между выходным напряжением U_2 и входным током $I_{\text{вх}}$; 4) передаточную ФЧХ $\psi_K = \psi_{u_2} = \psi_{i_{\text{вх}}} + \Delta\varphi$.

Как видно из рис. 6.8, передаточная ФЧХ цепи рис. 6.4 изменяется от 0 до -90° .

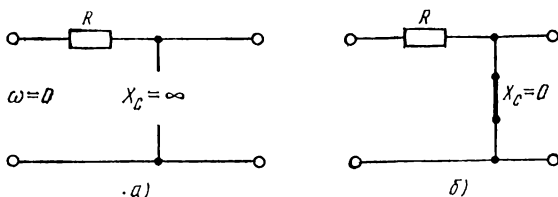


Рис. 6.7

Проведенные рассуждения справедливы для разветвленных цепей с одним накопителем энергии, хотя кривые входных и передаточных характеристик могут в ряде случаев иметь более сложный вид.

Рассмотрим цепь рис. 6.9. При $\omega = 0$ цепь приобретает вид, показанный на рис. 6.10, а при $\omega = \infty$ — на рис. 6.11. Из этих ри-

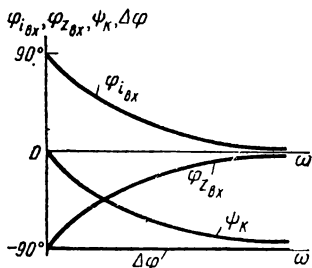


Рис. 6.8

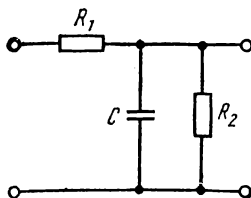


Рис. 6.9

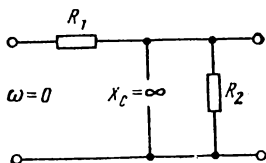


Рис. 6.10

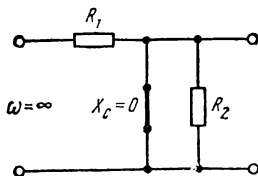


Рис. 6.11

сунков видно, что при изменении частоты от 0 до ∞ модуль входного сопротивления изменяется от $R_1 + R_2$ до R_1 , а аргумент $\varphi_{Z_{\text{вх}}}$ — от 0 до 0 (поскольку и при $\omega = 0$, и при $\omega = \infty$ входное сопротивление цепи имеет чисто резистивный характер). Но так как на любых частотах, отличных от предельных, цепь является рези-

стивно-емкостной и аргумент комплексного входного сопротивления отличен от нуля, то кривая входной ФЧХ имеет экстремум. Модуль передаточной функции изменяется от $R_2/(R_1 + R_2)$ до 0. Кривые $Z_{вх} = f(\omega)$; $\varphi_{Z_{вх}} = f(\omega)$; $K = f(\omega)$ показаны на рис. 6.12. Построение передаточной ФЧХ аналогично построению, рассмотренному ранее. Кривая $\varphi_{i_{вх}} = f(\omega)$ представляет собой зеркальное отображение кривой $\varphi_{Z_{вх}} = f(\omega)$, кривую $\Delta\varphi = f(\omega)$ строят согласно выражению

$$\Delta\varphi = \operatorname{arctg}(B_{\text{вых}}/G_{\text{вых}}) = \operatorname{arctg}\left(\frac{-\omega C}{1/R_2}\right) = -\operatorname{arctg} \omega R_2 C$$

[если бы выходные элементы были соединены последовательно, то характеристика $\Delta\varphi = f(\omega)$ определялась из выражения $\Delta\varphi = \operatorname{arctg}(X_{\text{вых}}/R_{\text{вых}})$].

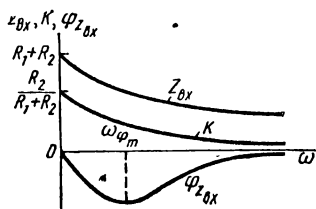


Рис. 6.12

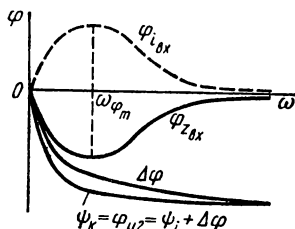


Рис. 6.13

Поскольку кривая $\Delta\varphi = f(\omega)$ нарастает круче кривой $\psi_{Z_{вх}} = f(\omega)$, знак характеристики $\psi_K = \psi_{u2} = \psi_{i_{вх}} + \Delta\varphi$ во всем диапазоне частот остается неизменным (в данной цепи отрицательным), а передаточная ФЧХ изменяется от 0 до -90° (рис. 6.13). Все качественные соотношения можно подтвердить числовыми расчетами:

$$Z_{\text{вх}} = R_1 + \frac{R_2 1/j\omega C}{R_2 + 1/j\omega C} = \frac{\omega R_1 R_2 C - j(R_1 + R_2)}{\omega R_2 C - j},$$

откуда

$$\begin{aligned} Z_{\text{вх}} &= \sqrt{\frac{(\omega R_1 R_2 C)^2 + (R_1 + R_2)^2}{(\omega R_2 C)^2 + 1}} = \\ &= \sqrt{\frac{(R_1 R_2 C)^2 + \left(\frac{R_1 + R_2}{\omega}\right)^2}{(R_2 C)^2 + 1/\omega^2}}, \\ \varphi_{Z_{\text{вх}}} &\approx -\operatorname{arctg}\left(\frac{\omega R_2^2 C}{\omega^2 R_1 R_2^2 C^2 + R_1 + R_2}\right) = \\ &= -\operatorname{arctg}\left[\frac{(R_2^2 C/\omega)}{R_1 R_2^2 C^2 + \frac{R_1 + R_2}{\omega^2}}\right] = -\operatorname{arctg} N, \end{aligned}$$

где N — аргумент данного выражения.

Определим предельные значения характеристик. При $\omega = 0$ $Z_{вх} = R_1 + R_2$; $\varphi_{Z_{вх}} = 0$, при $\omega = \infty$ $Z_{вх} = R_1$; $\varphi_{Z_{вх}} = 0$.

Найдем частоту, при которой входная фазная характеристика имеет максимальное (по модулю) значение. Для этого исследуем функцию $\varphi_{Z_{вх}}$ на экстремум: $\frac{dN}{d\omega} = 0$ (в данном случае функция максимальна, если максимален аргумент, поскольку в цепях с одним резистивным элементом $|\varphi_{Z_{вх}}| < 90^\circ$), т. е.

$$\frac{(\omega R_2^2 C)' (\omega^2 R_1 R_2^2 C^2 + R_1 + R_2) - (\omega^2 R_1 R_2^2 C^2 + R_1 + R_2)' (\omega R_2^2 C)}{(\omega^2 R_1 R_2^2 C^2 + R_1 + R_2)^2} = 0,$$

откуда

$$\omega_{(\varphi_m)} = \frac{1}{R_2 C} \sqrt{1 + R_2/R_1}; \quad f_{(\varphi_m)} = \frac{1}{2\pi R_2 C} \sqrt{1 + R_2/R_1}.$$

Рассчитаем $|\varphi_{Z_{вх} \max}|$:

$$|\varphi_{Z_{вх} \max}| = \arctg \left[\frac{\omega_{(\varphi_m)} R_2^2 C}{\omega_{(\varphi_m)}^2 R_1 R_2^2 C^2 + R_1 + R_2} \right] = \arctg \left[\frac{R_2}{2 \sqrt{R_1 (R_1 + R_2)}} \right] = \arctg \left[\frac{1}{2 \sqrt{(R_1/R_2)^2 + (R_1/R_2)}} \right].$$

Частные случаи. При $R_1 = R_2 = R$ $|\varphi_{Z_{вх} \max}| = 19^\circ 20'$, при $R_1 = R$, $R_2 = 2R$ $|\varphi_{Z_{вх} \max}| = 30^\circ$ и т. д.

Определим передаточные характеристики данной цепи. Обозначим $Z_1 = R_1$; $Z_2 = \frac{R_2/(j\omega C)}{R_2 + 1/(j\omega C)}$.

Тогда

$$K = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2) + j\omega R_1 R_2 C},$$

откуда

$$K = \frac{R_2}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\omega R_1 R_2 C)^2}}; \quad \varphi_K = -\arctg \left(\frac{\omega R_1 R_2 C}{R_1 + R_2} \right).$$

При $\omega = 0$ $K = R_2/(R_1 + R_2)$; $\varphi_K = 0$, при $\omega = \infty$ $K = 0$; $\varphi_K = -90^\circ$.

Критерии возможных пренебрежений. Если оказывается, что одно слагаемое выражения много меньше другого, то меньшим слагаемым можно пренебречь. При этом возникает некоторая погрешность δ . Как известно, если A_d — действительное значение величины; A_n — ее приближенное значение, то погрешность, возникающая от замены действительного значения приближенным, $\delta = \frac{A_d - A_n}{A_d} \cdot 100$, где δ — относительная погрешность, %.

Пусть две величины складываются геометрически (что и имеет место в цепях с резистивными и реактивными элементами). Примем большую величину за единицу, а меньшую обозначим через B . Опре-

делим, при каких значениях B ею можно пренебрегать, чтобы погрешность не превысила заданного значения δ . Очевидно, что в этом случае $\delta = \frac{\sqrt{1+B^2} - 1}{\sqrt{1+B^2}} \cdot 100$. Решив это уравнение относительно B , получим

$$B \leq \sqrt{\frac{100^2}{(100 - \delta^2)} - 1}; \quad B \leq \sqrt{\frac{1}{(1 - \delta)^2} - 1}.$$

В последнем выражении δ выражают в относительных единицах. При $\delta = 0,5\%$ $B = 0,1$, при $\delta = 5\%$ $B = 0,33$. Таким образом, если две величины складываются геометрически и модуль меньшего

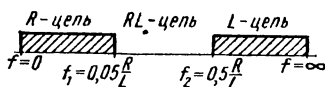


Рис. 6.14

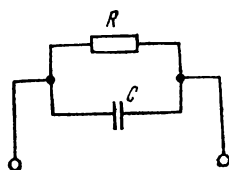


Рис. 6.15

элемента составляет 0,1 модуля большего, то погрешность при пренебрежении меньшей величиной по модулю не превышает 0,5 %;

а по аргументу $\varphi = \arctg \frac{0,1}{1} = 5^\circ 44'$. Если меньшая величина отличается от большей в три раза, то погрешность при отбрасывании меньшей величины по модулю не превышает 5 %, а по аргументу — $18^\circ 30'$. Как правило, в RLC -цепях понятие «много больше» означает, что данная величина по крайней мере в три раза больше меньшей величины.

Определим частоты, при которых входное сопротивление RLC -цепи имеет практически резистивный, а при каких — реактивный характер. В последовательной RL -цепи (рис. 6.1) $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$. Но практически входное сопротивление цепи остается резистивным, если $R \geq 3X_L$, откуда $R \geq 3 \cdot 2\pi f_1 L$ или $f_1 \leq \frac{R}{6\pi L} = 0,053 \frac{R}{L} \approx 0,05 \frac{R}{L}$, а $2\pi f_2 L \geq 3R$, или $f_2 \geq \frac{3R}{2\pi L} = 0,478 \frac{R}{L} \approx 0,5 \frac{R}{L}$. Следовательно, входное сопротивление последовательной RL -цепи в диапазоне от $f = 0$ до $f = f_1$ можно считать резистивным, а в диапазоне от $f = f_2$ до $f = \infty$ — индуктивным. В диапазоне от f_1 до f_2 входное сопротивление цепи является комплексным (рис. 6.14).

Легко видеть, что при параллельном соединении элементов можно пренебрегать ветвью в том случае, когда ее полная проводимость хотя бы в три раза меньше полной проводимости другой ветви. На этом основании цепь рис. 6.15 при $\frac{1}{R} \geq 3\omega C$ можно считать рези-

стивной, а при $\omega C \geq 3 \frac{1}{R}$ — емкостной. Следует также иметь в виду, что на практике в качестве предельного соотношения часто принимают $\sqrt{10} = 3,16$, что удобно при расчетах. При округлении 0,053 до 0,05, а 0,478 до 0,5 трехкратное соотношение заменяют на 3,16.

При анализе могут встречаться случаи, при которых критерии пренебрежений должны быть более строгими. Об этом можно судить или из постановки задачи, или из дополнительных ограничений, накладываемых на задачу (эксперимент). Критерий 3(3,16)-кратного соотношения является близким к предельно допустимому.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать $f_{гр}$ для схемы рис. 6.4, если $R = 100 \text{ Ом}$; C выбирают по варианту задания.

2. Определить частоты f , при которых модуль коэффициента передачи принимает значения $K = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$. Результаты расчетов занести в табл. 6.1.

3. Вычислить $\varphi_{Z_{вх}}$, ψ_K , I для частот, полученных в п. 2, если $U = 5 \text{ В}$. Выбрать оптимальное значение $R_{ш}$, исходя из сопротивлений резисторов, имеющихсся на стенде. Результаты расчетов занести в табл. 6.1 и 6.2.

4. Для схемы рис. 6.9 найти частоту f_{φ_m} , при которой аргумент входного сопротивления оказывается наибольшим, а также характеристику $\varphi_{Z_{вх \max}}$, если $R_2 = 2R_1$, а R_1 выбирают согласно варианту задания (например, $R_1 = 100 \text{ Ом}$).

5. Рассчитать $\varphi_{Z_{вх}}$, K , ψ_K для схемы рис. 6.9, если $f = 0,1f_{\varphi_m}$; $f = 0,25f_{\varphi_m}$; $f = 0,5f_{\varphi_m}$; $f = f_{\varphi_m}$; $f = 2f_{\varphi_m}$; $f = 4f_{\varphi_m}$. Результаты расчетов занести в табл. 6.3.

6. По результатам предварительного расчета построить кривые для схем рис. 6.4 и 6.9: $Z_{вх} = F(f)$; $I_{вх} = F(f)$; $\varphi_{Z_{вх}} = F(f)$; $\psi_K = F(f)$.

Задание. Исследовать входные и передаточные характеристики разветвленной и неразветвленной цепей с одним реактивным элементом.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 6.16. Сопротивление измерительного резистора $R_{ш}$ должно быть таким, которое получилось в п. 3 предварительного расчета. Вывод «Сигнал» фазометра следует соединить с точкой B цепи. Вывод резистора R_2 к точке F , а также потенциальный входной зажим вольтметра V_2 к точке N не подключать.

2. Снять входные АЧХ и ФЧХ: $Z_{вх} = F(f)$; $\varphi_{Z_{вх}} = F(f)$. Для этого на вольтметре V_1 следует поддерживать напряжение $U_1 = 5 \text{ В} = \text{const}$, устанавливая частоты, полученные в п. 2 предварительного расчета. Результаты измерений занести в табл. 6.1.

3. Потенциальный вывод вольтметра V_2 подключить к точке N . Вывод «Сигнал» фазометра отключить от точки B и подключить к точке D . Резистор $R_{ш}$ замкнуть (внешним проводником соединить точки A и B).

4. Снять передаточные АЧХ и ФЧХ: $K = F(f)$; $\psi_K = F(f)$. Для этого на вольтметре V_1 следует поддерживать напряжение $U_1 = 5 \text{ В} = \text{const}$, устанавливать частоты, полученные в п. 2 предварительного расчета. Результаты измерений занести в табл. 6.2.

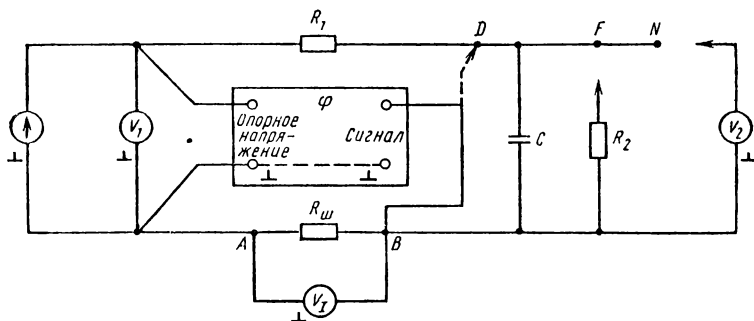


Рис. 6.1б

5. Включить параллельно конденсатору C резистор $R_2 = 200 \text{ Ом}$ (свободный вывод резистора R_2 подключить к точке F).

6. Снять передаточные АЧХ и ФЧХ: $K = F(f)$; $\psi_K = F(f)$. Для этого поддерживать $U_1 = 5 \text{ В} = \text{const}$, устанавливать на генераторы частоты, полученные в п. 5 предварительного расчета. Результаты измерений занести в табл. 6.3.

Таблица 6.1

$U_1 = 5 \text{ В}$; $R =$; $C =$; $f_{гр} =$							
По предварительному расчету				Получено при эксперименте		Рассчитано по экспериментальным данным	
K	f , кГц	$f/f_{гр}$	ψ_K , град	U_2 , В	ψ_K , град	K	ψ_K , град

Таблица 6.2

$U_1 = 5 \text{ В}; R = \quad ; C = \quad ; f_{\text{гр}} =$											
По предварительному расчету							Получено при эксперименте			Рассчитано по экспериментальным данным	
$f, \text{ кГц}$	$f_{\text{гр}}/f$	$Z_{\text{вх}}, \text{ Ом}$	$R_{\text{ш}}, \text{ Ом}$	$I, \text{ мА}$	$U_I, \text{ мВ}$	$\varphi_{Z_{\text{вх}}}, \text{ град}$	$U_I, \text{ мВ}$	$R_{\text{ш}}, \text{ Ом}$	$\varphi_{Z_{\text{вх}}}, \text{ град}$	$I, \text{ мА}$	$Z_{\text{вх}}, \text{ Ом}$

Таблица 6.3

$U_1 = 5 \text{ В}; R_1 = \quad ; R_2 = \quad ; C = \quad ; f_{\varphi_m} = \quad ; \varphi_m =$												
По предварительному расчету						Получено в эксперименте				Рассчитано по экспериментальным данным		
Точки	$f, \text{ кГц}$	K	$U_2, \text{ В}$	$\psi_k, \text{ град}$	$\varphi_{Z_{\text{вх}}}, \text{ град}$	$U_2, \text{ В}$	$\psi_k, \text{ град}$	$R_{\text{ш}}, \text{ Ом}$	$U_I, \text{ мВ}$	$\varphi_{Z_{\text{вх}}}, \text{ град}$	K	$I, \text{ мА}$
$0,1 f_{\varphi_m}$												
$0,25 f_{\varphi_m}$												

7. Вывод «Сигнал» фазометра отключить от точки D и подключить к точке B . Отключить вольтметр V_2 от точки N . Отсоединить перемычку, замыкающую точки A и B . Снять входные АЧХ и ФЧХ цепи: $Z_{\text{вх}} = F(f)$; $\varphi_{Z_{\text{вх}}} = F(f)$. Результаты измерений занести в табл. 6.3.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать входные токи $I_{\text{вх}}$, полные сопротивления по данным табл. 6.1. Построить кривые $I_{\text{вх}} = F(f)$; $Z_{\text{вх}} = F(f)$; $\varphi_{Z_{\text{вх}}} = F(f)$.

2. Найти значения K и ψ_K по данным табл. 6.2. Построить кривые $K = F(f)$; $\psi_K = F(f)$.

3. Определить значения K , $I_{\text{вх}}$, $Z_{\text{вх}}$ по данным табл. 6.3. Построить кривые $K = F(f)$; $I_{\text{вх}} = F(f)$; $Z_{\text{вх}} = F(f)$.

Примечание. Если на один график наносят несколько кривых, то каждую кривую следует вычерчивать определенным цветом.

4. Сравнить кривые, полученные по предварительному расчету, с аналогичными кривыми, полученными при эксперименте.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Постройте кривые $Z_{\text{вх}} = F(f)$; $\varphi_{Z_{\text{вх}}} = F(f)$; $K = F(f)$; $\psi_K = F(f)$ для схем на рис. 6.1, 6.4, 6.9, 6.17, 6.18.

2. Для схем рис. 6.1, 6.4, 6.17, 6.18 определите диапазон частот, в котором входное сопротивление цепи имеет практически резистивный или реактивный характер.

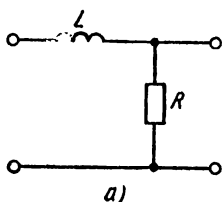


Рис. 6.17

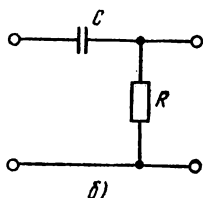
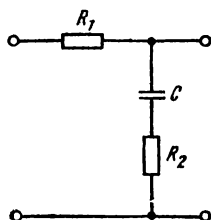


Рис. 6.18



3. Найдите частоту ω , при которой в схеме рис. 6.9 значение аргумента входного сопротивления максимальное. Чему равно $\varphi_{Z_{\text{вх}}}^{\text{max}}$?

4. Определите частоту $\omega_{\text{гр}}$ в схемах рис. 6.1, 6.4, 6.9, 6.17, 6.18.

5. Подсчитайте активную, реактивную и полную мощности для схем рис. 6.1, 6.4, 6.9.

6. В схемах рис. 6.1, 6.17, а, б $U_{\text{вх}} = \text{const}$; $\omega = \text{const}$; $L = \text{var}$. При каком значении L в цепи выделяется максимальная реактивная мощность? Чему равна эта мощность? Аналогично, для схем рис. 6.4, 6.17, б при $C = \text{var}$.

7. Рассчитайте и постройте кривые $K = f(R_1)$; $K = f(R_2)$ для схем рис. 6.9 и 6.18.

8. Постройте качественно кривые $K = f(\omega)$, $\psi_K = f(\omega)$ для схемы рис. 6.18.

9. Вычислите R_2 и C_2 для схем рис. 6.17, а, б, при которых $\varphi_{Z_{\text{вх}}}$ будет таким же, как в схеме рис. 6.4, если $f = 5 \text{ кГц}$.

10. Постройте векторные диаграммы для схемы рис. 6.1 при $f = 1 \text{ кГц}$; $f = 5 \text{ кГц}$; $f = 15 \text{ кГц}$; $f = f_{\text{гр}}$.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочесть по учебнику [1] § 3.2; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 7.1—7.4; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

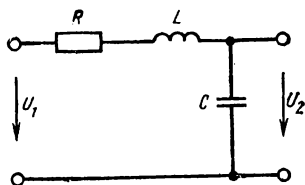


Рис. 7.1

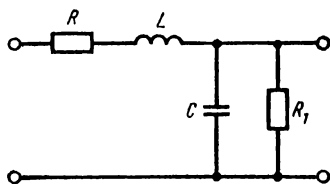


Рис. 7.2

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментально исследовать входные и передаточные характеристики одиночного последовательного контура.

Основными параметрами последовательного колебательного контура являются резонансная частота ω_p (f_p), характеристическое сопротивление ρ и добротность Q . Указанные параметры однозначно определяются через параметры элементов контура R , L , C . Резонансной называют частоту, при которой ток и напряжение на входе контура совпадают по фазе. В простейшей неразветвленной цепи (рис. 7.1) резонансная частота

$$\omega_p = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}; \quad f_p = f_0 = 1/(2\pi \sqrt{LC}).$$

В разветвленной цепи (рис. 7.2) резонансная частота

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - (\rho/R_H)^2} = \omega_0 \sqrt{1 - (\rho/R_H)^2} = \omega_0 \sqrt{1 - 1/Q^2}$$

При добротностях, превышающих несколько единиц, различие между ω_p и ω_0 столь мало, что практически обе величины оказываются равными между собой. В большинстве случаев резонансная частота последовательного контура

$$\omega_p = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

Характеристическим сопротивлением называют модуль сопротивления каждого реактивного элемента на резонансной частоте:

$$\rho = X_{L_0} = \omega_0 L = |X_{C_0}| = 1/(\omega_0 C) = \sqrt{L/C}.$$

Под добротностью контура понимают величину, пропорциональную отношению максимальной реактивной энергии,

запасенной в контуре при резонансе $W_{m(p)}$ к активной энергии, рассеиваемой контуром за период $W_{a(T)}$: $Q = 2\pi \frac{W_{m(p)}}{W_{a(T)}}$. Добротность можно выразить также через сопротивления или напряжения в цепи:

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{U_{C_0}}{U_1} = \frac{U_{L_0}}{U_1},$$

где R — сопротивление потерь контура; U_{L_0} , U_{C_0} — действующие значения напряжения на реактивном элементе контура (например, емкости) при резонансной частоте; U_1 — действующее значение напряжения на входе цепи.

Таким образом, напряжение на выходе контура при резонансе в Q раз больше напряжения на входе: $U_{20} = QU_1$. Добротность Q есть величина, обратная затуханию контура: $d = 1/Q$.

Если к выходным зажимам контура подключить резистор сопротивлением R_H , то в этом резисторе будет рассеиваться энергия, вследствие чего добротность цепи окажется меньше, чем добротность ненагруженного контура. Если $R_H \gg \rho$, то цепь рис. 7.2 можно заменить эквивалентной (рис. 7.3). Добротность нагруженного контура

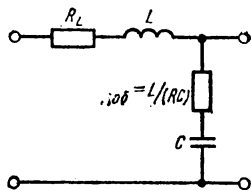


Рис. 7.3

контура $Q_{\text{эк}} = \frac{\rho}{R + L/(R_H C)} = \frac{Q}{1 + Q\rho/R_H}$. Если $R_H = \infty$, то $Q_{\text{эк}} = Q$, если $R_H = \rho$, то $Q_{\text{эк}} = 1$. Сопротивление нагрузки R_H мало влияет на резонансную частоту, но сильно сказывается на эквивалентной добротности нагруженного контура. Если частота внешнего источника ω совпадает с резонансной частотой контура ω_0 , то такой контур настроен в резонанс, если частота ω отличается от частоты ω_0 , то такой контур расстроен. *Абсолютной расстройкой* (Δf) называется разность между частотой генератора и резонансной частотой контура: $\Delta f = f - f_0$; $\Delta\omega = \omega - \omega_0$. *Относительной расстройкой* называют отношение $\Delta f/f_0$ ($\Delta\omega/\omega_0$). В расчетные формулы вводят удвоенную относительную расстройку

$$\varepsilon = (f/f_0 - f_0/f) \approx 2\Delta f/f_0 \approx 1 - f_0^2/f^2.$$

Важнейшей характеристикой состояния цепи является *обобщенная расстройка* ξ , приближенно равная произведению добротности контура Q на удвоенную относительную расстройку $\Delta f/f_0$, или тангенс аргумента входного сопротивления цепи;

$$\xi = x/r = (x_L - x_C)/r = \operatorname{tg} \varphi = Q\varepsilon = Q(f/f_0 - f_0/f) = \frac{2\Delta f}{f_0} Q,$$

где $x = \omega L - 1/(\omega C)$ — реактивная, а $r = R$ — резистивная составляющая входного сопротивления цепи. Обратите внимание на то, что добротность есть отношение сопротивления одного из реактивных элементов, а обобщенная расстройка — всех реактивных элементов контура к резистивной составляющей сопротивления цепи. При $\omega = 0$ $\xi = -\infty$, при $\omega = \omega_0$ $\xi = 0$, при $\omega = \infty$ $\xi = +\infty$.

При расчете входных и передаточных АЧХ удобно использовать безразмерную величину $\frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}}$, называемую *предельной норми-*

рованной частотной характеристикой контура. При этом норми-

рованная АЧХ входной проводимости определяется из выражения $Y/Y_0 = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}}$, входного сопротивления — из соотношения $Z = Z_0 \sqrt{1+\xi^2}$ (кривая *a* на рис. 7.4), входного тока из формулы $I/I_0 = 1/\sqrt{1+\xi^2}$ (кривая *b* на рис. 7.4). Передаточная АЧХ при

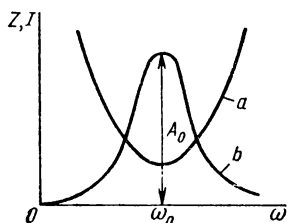


Рис. 7.4

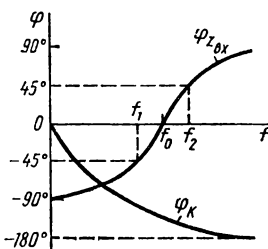


Рис. 7.5

малых расстройках подчиняется закону $U_C/U_{C_0} = 1/\sqrt{1+\xi^2}$. Кривые, построенные в соответствии с выражениями вида $F(\omega) = 1/\sqrt{1+\xi^2}$ (кривая *b* на рис. 7.4), называют *резонансными*, а в соответствии с выражениями вида $F(\omega) = \sqrt{1+\xi^2}$ (кривая *a* на рис. 7.4) — *обратными резонансным*.

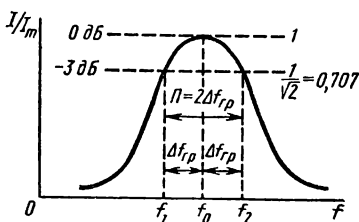


Рис. 7.6

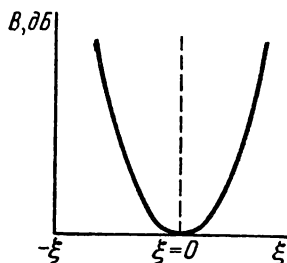


Рис. 7.7

Напряжение на емкостном элементе при резонансной частоте в Q раз больше входного напряжения $U_{C_0} = K_0 U_1 = Q U_1$.

Входная ФЧХ описывается выражением $\varphi_{Z_{вх}} = \arctg \xi$, а передаточная — выражением $\varphi_K = -(\arctg \xi + 90^\circ)$ (рис. 7.5).

Граничными называют частоты f_1 и f_2 , на которых действующее значение тока (напряжения на выходе или передаточной функции) уменьшается на 3 дБ (т. е. в $\sqrt{2}$ раз) по сравнению со значени-

ем соответствующей величины, измеренной на резонансной частоте (рис. 7.6). Диапазон частот от f_2 до f_1 называют *абсолютной шириной полосы пропускания контура*: $\Pi = 2\Delta f_{гр} = f_0/Q$, где $\Delta f_{гр} \approx f_2 - f_1 \approx f_0 - f_1$. Граничные частоты находят из выражений

$$f_{12} \approx f_0 \mp \frac{\Pi}{2} = f_0 \mp \frac{f_0}{2Q} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{LC}} \mp \frac{r}{2L} \right] = \\ = \frac{f_0}{2Q} (\sqrt{4Q^2 + 1} \mp 1) \approx \frac{f_0}{2Q} (2Q \mp 1).$$

На границе полосы пропускания в одиночном контуре обобщенная расстройка $\xi = \pm 1$. Разность фаз между входным напряжением и входным током на границе полосы пропускания составляет $|45^\circ|$. Относительная ширина полосы пропускания численно равна затуханию контура: $S_0 = d = 1/Q$.

Избирательность в общем случае $B = 20 \lg U_{C_0}/U_C$, где U_{C_0} , U_C — выходное напряжение на резонансной частоте и при расстройке; B — в дБ.

В последовательном колебательном контуре $B = 20 \lg \sqrt{1 + \xi^2}$ (рис. 7.7).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать резонансную частоту f_0 , добротность Q , затухание d , граничные частоты f_1 и f_2 для контура рис. 7.1. Исходные данные берут согласно варианту задания.

2. Определить характеристики $I = F(f)$; $U_C = F(f)$; $\varphi_{z_{вх}} = F(f)$; $K = F(f)$. Расчет производить для точек f_0 ; $f_0 \pm \Delta f_{гр}$; $f_0 \pm 1,73\Delta f_{гр}$; $f_0 \pm 4\Delta f_{гр}$; $f_0 \pm 10\Delta f_{гр}$ при $U_1 = 1 \text{ В} = \text{const}$. Результаты расчетов занести в табл. 7.1.

3. Вычислить и занести в табл. 7.2 частоты f_1 , f_2 , характеристики $U_C = F(f)$, $\varphi_{z_{вх}} = F(f)$, если сопротивление R увеличить на 100 Ом. Расчет производить для точек f_0 ; $f_0 \pm 50 \text{ Гц}$; $f_0 \pm 100 \text{ Гц}$; $f_0 \pm 200 \text{ Гц}$; $f_0 \pm 500 \text{ Гц}$.

4. Найти $r_{доб}$, $r_{вх}$, Q_k , Π_k , f_{1k} , f_{2k} , если $R_n = 10\rho$, где R_n — сопротивление резистора, включенного параллельно конденсатору C . Результаты расчетов занести в табл. 7.3.

5. Рассчитать f'_0 , Q' , S'_0 , Π' , f'_1 , f'_2 , если емкость C уменьшается на значение, указанное в варианте стенда. Результаты расчетов занести в табл. 7.4.

Задание. Экспериментально исследовать входные и передаточные характеристики одиночного последовательного колебательного контура и сравнить результаты, полученные экспериментально, с аналогичными результатами, полученными при предварительном расчете.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 7.8. На генераторе установить частоту меньше резонансной на 500 Гц. Регулятор выходного сопротивления должен находиться в положении

минимального сопротивления. При этом выходное сопротивление генератора окажется либо меньше, либо больше сопротивления потерь контура R . Поддерживать на вольтметре V_1 напряжение, для которого производился предварительный расчет, увеличивать частоту. По мере приближения к резонансной частоте ток в цепи и падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора возрастают, а так как ЭДС генератора остается неизменной, то напряжение на выходных зажимах генератора уменьшается. Если внутреннее

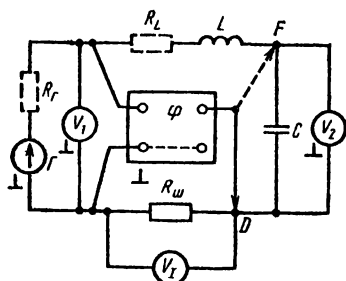


Рис. 7.8

сопротивление генератора меньше сопротивления потерь контура, то при приближении к резонансной частоте уменьшение напряжения U_1 будет незначительным, а увеличение напряжений U_2 и U_1 достаточно большим. Если внутреннее сопротивление генератора больше сопротивления R , то уменьшение напряжения на входе контура происходит заметнее, причем тем

больше, чем больше добротность контура. Таким образом, при малых R_r резонансную частоту удобнее находить по максимуму показаний приборов V_2 и V_1 , а при больших — по минимуму показания прибора V_1 .

2. Найдя резонансную частоту $f_{0 \text{ эксп}}$, регулятором выходного напряжения генератора увеличить это напряжение до заданного (например, 1 В), после чего занести показания приборов в табл. 7.1. Из-за неизбежных погрешностей аппаратуры резонансная частота и значения других величин, полученных экспериментально, могут несколько отличаться от аналогичных величин, найденных расчетным путем.

3. Устанавливать поочередно частоты $(f_{0 \text{ эксп}} \pm \Delta f_{\text{гр}})$ Гц; $(f_{0 \text{ эксп}} \pm 1,73\Delta f_{\text{гр}})$ Гц; $(f_{0 \text{ эксп}} \pm 4\Delta f_{\text{гр}})$ Гц; $(f_{0 \text{ эксп}} \pm 10 \Delta f_{\text{гр}})$ Гц.

Показания всех приборов занести в табл. 7.1.

Примечание. Значения всех частот, кроме $f_{0 \text{ эксп}}$, $f_{0 \text{ эксп}} \pm \Delta f_{\text{гр}}$ и $f_{0 \text{ эксп}} \pm 1,73\Delta f_{\text{гр}}$, можно округлять до ближайших значений, удобных для отсчета.

4. Последовательно с индуктивной катушкой включить резистор $R_1 = 100$ Ом, установить $R_{\text{ш}} = 10$ Ом.

5. Снять зависимости $I = F(f)$; $U_2 = F(f)$ при $U_1 = 1 \text{ В} = \text{const}$. Устанавливать частоты $f_{0 \text{ эксп}}$; $(f_{0 \text{ эксп}} \pm 100)$ Гц;

Таблица 7.1

$U_1 = 1 \text{ В}; R = \text{ ; } L = \text{ ; } C = \text{ ; } R_{\text{ш}} = 1 \text{ Ом}; f_1 = \text{ ; } f_2 = \text{ ;}$															
Точки	По предварительному расчету							Получено в эксперименте					Рассчитано по экспериментальным данным		
	$\Delta f, \text{ Гц}$		$f, \text{ Гц}$	$I, \text{ мА}$	$U_C, \text{ В}$	$\varphi_{Z_{\text{вх}}}, \text{ град}$	$\varphi_K, \text{ град}$	$f_{\text{эксп}}, \text{ Гц}$	$U_I, \text{ мВ}$	$\varphi_{Z_{\text{вх}}}, \text{ град}$	$U_2, \text{ В}$	$\varphi_K, \text{ град}$	$I, \text{ мА}$	$B, \text{ дБ}$	Остальные величины
															$R = \text{ ; } Q = \text{ ; } ;$ $S_0 = \text{ ; } \Pi = \text{ ; } ;$ $f_1 = \text{ ; } f_2 = \text{ ; } ;$

Таблица 7.2

$U_1 = 1 \text{ В}; R_L = \dots + 100 \text{ Ом}; R_{\text{ш}} = 10 \text{ Ом}; L = \dots; C = \dots$														
Точки	По предварительному расчету					Получено в эксперименте					Рассчитано по экспериментальным данным			
	$f, \text{Гц}$	$\Delta f, \text{Гц}$	$U_C, \text{В}$	$\varphi Z_{\text{вх}}, \text{град}$	$\varphi Z_{\text{вх}}, \text{град}$	$f_{\text{экс}}, \text{Гц}$	$U_I, \text{мВ}$	$\varphi Z_{\text{вх}}, \text{град}$	$U_2, \text{В}$	$\varphi_K, \text{град}$	$I, \text{мА}$	$B, \text{дБ}$	Остальные величины	
													$R = \dots; Q = \dots;$	$S_0 = \dots; P = \dots;$
													$f_1 = \dots; f_2 = \dots$	

Таблица 7.3

$U_1 = 1 \text{ В}; R = ; L = ; C = ; R_H = 10 \rho = ; R_{ш} = 10 \text{ Ом}$									
Точки	Получено в эксперименте				Рассчитано по экспериментальным данным			По предварительному расчету	
	$f, \text{ Гц}$	$U_I, \text{ мВ}$	$\varphi_{Z_{вх}}, \text{ град}$	$U_2, \text{ В}$	$\varphi_K, \text{ град}$	$I, \text{ мА}$	$B, \text{ дБ}$		
								$r_{доб} = ; R_{вх} = ;$ $Q_{эк} = ; S_{0эк} = ;$ $P_{эк} = ; f_{1эк} = ;$ $f_{2эк} =$	$r_{доб} = ; R_{вх} = ;$ $Q_{эк} = ; S_{0эк} = ;$ $P_{эк} = ; f_{1эк} = ;$ $f_{2эк} =$

Таблица 7.4

$U_1 = 1 \text{ В}; R = ; L = ; C = ; R_{ш} = 1 \text{ Ом}$									
Точки	Получено в эксперименте				Рассчитано по экспериментальным данным			По предварительному расчету	
	$f, \text{ Гц}$	$U_I, \text{ мВ}$	$\varphi_{Z_{вх}}, \text{ град}$	$U_2, \text{ В}$	$\varphi_K, \text{ град}$	Остальные величины			
						$I, \text{ мА}$	$B, \text{ дБ}$		
								$Q = ; S_0 = ; P = ;$ $f_1 = ; f_2 =$	$Q = ; S_0 = ; P = ;$ $f_1 = ; f_2 =$

$(f_0 \text{ эксп} \pm 200) \text{ Гц}$; $(f_0 \text{ эксп} \pm 500) \text{ Гц}$. Результаты измерений занести в табл. 7.2.

6. Закоротить резистор $R_1 = 100 \text{ Ом}$, параллельно конденсатору подключить резистор $R_2 = 10 \text{ р}$ (в качестве резистора использовать магазин сопротивлений). Снять характеристики $I = F(f)$ и $U_2 = F(f)$ для частот, указанных в п. 5. Результаты измерений занести в табл. 7.3.

7. Отключить резистор $R_2 = 10 \text{ р}$. Вместо конденсатора емкостью C_1 включить конденсатор емкостью $C_2 < C_1$. Установить $R_{\text{ш}} = 1 \text{ Ом}$. Экспериментально определить резонансную частоту f'_0 , снять характеристики $I = F(f)$ и $U_2 = F(f)$. Устанавливать частоты f'_0 ; $f'_0 \pm 50 \text{ Гц}$; $f'_0 \pm \pm 100 \text{ Гц}$; $f'_0 \pm 150 \text{ Гц}$. Результаты измерений занести в табл. 7.4.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать действующие значения токов для всех проведенных измерений.

2. Различными цветами начертить кривые $I = F(f)$; $U_2 = F(f)$ в диапазоне от $f_0 - 1000$ до $f_0 + 1000 \text{ Гц}$ по данным, полученным экспериментально (табл. 7.1).

3. Построить кривые $U_2 = F(f)$ в диапазоне от $f_0 - 250$ до $f_0 + 250 \text{ Гц}$ по данным табл. 7.1—7.4.

4. Определить резистивную составляющую входного сопротивления контура для различных схем согласно выражению $R_L = U_1/I_0 - R_{\text{ш}} = (U_1/U_{I_0} - 1) R_{\text{ш}}$, где U_{I_0} — показания вольтметра V_I при резонансе.

5. Рассчитать для всех исследуемых цепей добротность контура, полученную экспериментально: $Q = U_{20}/U_1$. По кривым $U_2 = F(f)$ определить граничные частоты, относительную и абсолютную ширину полосы пропускания. Результаты, полученные экспериментально, сравнить с аналогичными результатами, найденными при предварительном расчете.

6. Построить рассчитанные и экспериментальные входные ФЧХ и передаточные АЧХ.

7. Вычислить избирательность B (дБ) для всех произведенных измерений. Начертите различными цветами кривые $B = F(f)$ для всех исследованных цепей.

8. Рассчитать по экспериментальным данным добротность контура LC_2 и сравнить с добротностью контура LC_1 .

9. Построить в масштабе векторные диаграммы RLC -цепи для частот f_0 ; f_1 ; f_2 , где f_1 , f_2 — граничные частоты.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как определить резонансную частоту ω_0 , добротность Q , затухание d различных цепей?
2. Рассчитать расстройки (абсолютные, относительные, обобщенные) в последовательном контуре.
3. Чему равна обобщенная расстройка ξ при: а) $f = 0$; б) $f = f_1$; в) $f = f_0$; г) $f = f_2$; д) $f = \infty$?
4. Вычислить комплексные входное сопротивление и ток RLC -контура при: а) резонансе; б) расстройке.
5. Определить напряжение на R , L , C при: а) резонансе, б) расстройке контура.
6. Как найти разность фаз между выходным и входным напряжениями при: а) резонансе, б) расстройке?
7. Как определить ширину полосы пропускания последовательного контура?
8. Как рассчитать граничные частоты для последовательного контура?
9. Как изменяются при резонансе ток в цепи I , активная мощность, потребляемая контуром P_a , напряжения U_R , U_L , U_C , если сопротивление контура R увеличить в два раза?
10. Каким образом экспериментально определить резонансную частоту цепи, если внутреннее сопротивление генератора: а) мало; б) велико?
11. Построить векторные диаграммы контура при: а) резонансе, б) расстройке.
12. На некоторой частоте $X = X_L - X_C = 2R$. Вычислить $Z_{вх}$, $I_{вх}$, $\Phi_{Z_{вх}}$.
13. Каким должно быть отношение $\Delta f / \Pi$, при котором $I = 0,5I_0$ (I_0 — ток при резонансе)?
14. Рассчитайте I/I_0 при $\Delta f = 1,5\Pi$.
15. Найдите мгновенное значение тока i и напряжения на емкостном элементе u_C , если частота генератора равна: а) резонансной f_0 ; б) нижней граничной частоте f_1 ; в) верхней граничной частоте f_2 ?
16. Какие способы настройки последовательного колебательного контура вы знаете?
17. Изменится ли, и если изменится, то во сколько раз, абсолютная ширина полосы пропускания Π , если уменьшить в два раза: а) индуктивность; б) емкость; в) сопротивление контура.
18. Во сколько раз активная мощность, выделяемая в контуре на граничной частоте, отличается от мощности на резонансной частоте?
19. В схеме рис. 7.1 контур настроен в резонанс. На какое значение ΔC следует изменить емкость C , чтобы контур был настроен не на резонансную, а на граничную частоту?
20. Выберите R , L , C так, чтобы обеспечить $f_0 = 5$ кГц; $Q = 50$.
21. Определите коэффициент перекрытия контура $f_{0\max}/f_{0\min}$, если $L = 253$ мкГн, а емкость изменяется от $C_1 = 25$ пФ до $C_2 = 400$ пФ.

22. Найдите резонансную частоту f_0 контура, если при изменении емкости $C = 100$ пФ на $\Delta C = 10$ пФ $\Delta f = 55$ кГц.
23. Вычислите U_C/U_{C_0} , если $f = 0,95f_0$; $Q = 20$.
24. Как изменятся ω_0 , Q , d , Π , f_1 , f_2 , если в схеме рис. 7.2 изменить: а) R ; б) R_H (при $R_H \gg \rho$).
25. Как рассчитать избирательность контура?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

При подготовке к выполнению работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 3.3; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 8.1—8.4; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментально исследовать входные и передаточные характеристики одноконтурного параллельного колебательного контура при различных значениях внутреннего сопротивления источника.

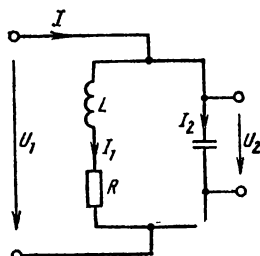


Рис. 8.1

При добротностях, составляющих хотя бы несколько единиц (3—5), резонансную частоту ω_0 (f_0), характеристическое сопротивление ρ , добротность Q параллельного колебательного контура (рис. 8.1) рассчитывают по тем же формулам, как и для последовательного контура. Модуль входного сопротивления $|Z_{вх}| = R_0 / \sqrt{1 + \xi^2}$, где R_0 — входное сопротивление параллельного контура на резонансной частоте, причем $R_0 = L/(RC) = \rho^2/R = Q^2 R = Q\rho$. Характеристика $Z_{вх}/R_0 = 1/\sqrt{1 + \xi^2}$ имеет такой же вид, как и резонансная кривая последовательного колебательного контура (рис. 8.2). ФЧХ входного сопротивления представляет собой зеркальное отображение аналогичной кривой в последовательном контуре (рис. 8.3). Если к входным зажимам контура подключен источник напряжения $u = e = E \sqrt{2} \cos \omega t$, то действующее значение тока в цепи $I = \frac{E}{R_0} \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}} = I_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}$ (рис. 8.4). а $K=1 = \text{const}$. Ток в каждом реактивном элементе при резонансной частоте в Q раз больше тока в неразветвленной части цепи: $I_{20} = QI_0$.

Чтобы действующее значение напряжения на выходе контура изменялось в зависимости от частоты входного сигнала, необходимо иметь цепь, в которой действующее значение тока во входной цепи остается практически постоянным при изменении частоты действующего напряжения. Для получения такого режима последова-

тельно с источником включают резистор сопротивлением R_i много большим, чем сопротивление контура на резонансной частоте R_0 (рис. 8.5). При $R_i \gg R_0$ передаточная функция цепи становится величиной частотно-зависимой. Так как в резисторе R_i рассеивается мощность, то эквивалентная добротность $Q_{\text{эк}}$ оказывается меньше добротности контура Q : $Q_{\text{эк}} = \frac{Q}{1 + R_0/R_i}$. При $R_i \rightarrow 0$ $Q_{\text{эк}} \rightarrow 0$.

На практике выбирают $R_i = (3 \div 8) R_0$. В этом случае $|K| = \frac{R_0}{R_i} \times \frac{Q}{\sqrt{1 + \xi_{\text{эк}}^2}}$.

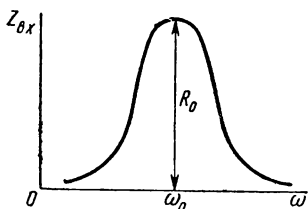


Рис. 8.2

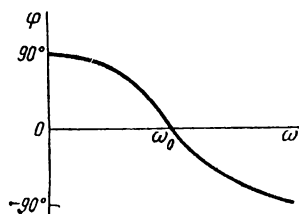


Рис. 8.3

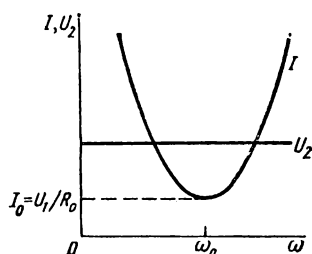


Рис. 8.4

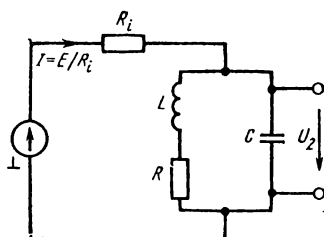


Рис. 8.5

Если к выходным зажимам контура подключить резистор сопротивлением R_n , то вместо R_i во все расчетные выражения необходимо подставлять $(R_i R_n)/(R_i + R_n)$.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать резонансную частоту f_0 и добротность контура Q для схемы рис. 8.1. Значения R , L , C выбираются в соответствии с номером стенда.

Примечание. Если параллельный контур собирают из тех же элементов, что и последовательный контур, то f_0 и Q будут иметь значения, которые получили при предварительном расчете в работе № 7.

Результаты расчетов, выполняемых согласно п. 1—5, занести в табл. 8.1.

2. Найти значения ξ , Δf и $f = f_0 \pm \Delta f$, при которых $Z_{вх}/R_0 = 1; 0,707; 0,5; 0,33; 0,2; 0,1$.

3. Определить модули входного сопротивления контура на частотах, значения которых получены в п. 2.

4. Выбрать измерительные сопротивления $R_{ш}$ из находящихся в комплекте (напомним, что на панели имеются $R_{ш} = 1; 10; 100 \text{ Ом}$), при которых модуль тока в неразветвленной цепи может быть измерен наилучшим образом.

5. Зная $Z_{вх}$, $R_{ш}$, вычислить для каждой частоты действующие значения тока в неразветвленной части цепи I , показания милливольтметра U_1 , модули токов в индуктивной $|I_1|$ и емкостной $|I_2|$ ветвях, модуль выходного напряжения $|U_C|$, сдвиг фаз между входным напряжением и током $\varphi_{Z_{вх}}$.

6. Рассчитать и занести в табл. 8.2 характеристики $Z_{вх} = F(f)$; $I = F(f)$; $\varphi_{Z_{вх}} = F(f)$, если последовательно с индуктивной катушкой включить резистор сопротивлением 100 Ом . Расчет производить для частот f_0 ; $f_0 \pm 200 \text{ Гц}$; $f_0 \pm 400 \text{ Гц}$; $f_0 \pm 600 \text{ Гц}$; $f_0 \pm 800 \text{ Гц}$. Определить соответствующие значения $R_{ш}$ и U_1 .

7. Вычислить и занести в табл. 8.3 значения $Q_{эк}$, характеристики $U_C = F(f)$ цепи, собранной по схеме рис. 8.5, если $R_i = 100 \text{ кОм}$. Расчет производить для частот f_0 ; $f_0 \pm 100 \text{ Гц}$; $f_0 \pm 200 \text{ Гц}$; $f_0 \pm 300 \text{ Гц}$; $f_0 \pm 400 \text{ Гц}$; $f_0 \pm 500 \text{ Гц}$.

Задание. Исследовать входные и передаточные АЧХ и ФЧХ параллельного колебательного контура при различных значениях внутреннего сопротивления источника.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 8.6. На генераторе установить частоту ($f_0 \sim 500$) Гц и напряжение, для которого производился предварительный расчет. Потенциальный вывод вольтметра V_2 подключить к точке М. На переключате-

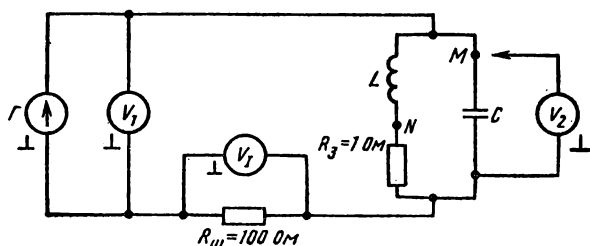


Рис. 8.6

лях пределов приборов V_I и V_1 установить значения, соответствующие напряжениям, полученным по предварительному расчету.

2. Медленно увеличивать частоту генератора. По мере приближения к резонансной частоте сопротивление параллельного контура возрастает, ток в неразветвленной цепи, а следовательно, и показания прибора V_I уменьшаются. Найти резонансную частоту. (Следует иметь в виду, что из-за неизбежных погрешностей аппаратуры и деталей цепи, резонансная частота, полученная в эксперименте $f_{0 \text{ эксп}}$, может несколько отличаться от f_0 , найденной аналитически.) Показания всех приборов занести в табл. 8.4.

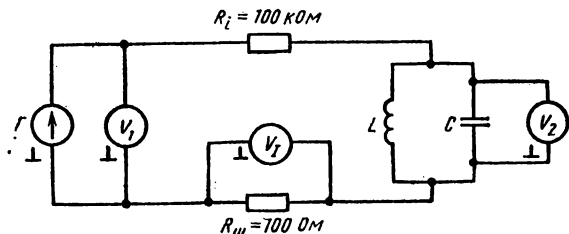


Рис. 8.7

3. Снять характеристики $I = F(f)$, $U_2 = F(f)$. Устанавливать частоты $f_{0 \text{ эксп}} \pm \Delta f$, где Δf — значения абсолютных расстроек, полученные в п. 2 предварительного расчета.

4. Установить частоту, равную резонансной частоте $f_{0 \text{ эксп}}$. Потенциальный вывод вольтметра V_2 отключить от точки M и подключить к точке N , измерить падение напряжения на резисторе R_3 .

5. Вместо резистора $R_3 = 1$ Ом включить резистор $R_4 = 100$ Ом. При этом резистивное сопротивление индуктивной ветви станет равным $(r_L + 100)$ Ом. Потенциальный вывод вольтметра V_2 оставить подключенным к точке N . Измерить падение напряжения на резисторе $R_4 = 100$ Ом.

6. Потенциальный вывод вольтметра V_2 подключить к точке M . Снять характеристики $I = F(f)$; $U_C = F(f)$. Установить частоты $f_{0 \text{ эксп}}$; $f_{0 \text{ эксп}} \pm 200$ Гц; $f_{0 \text{ эксп}} \pm 400$ Гц; $f_{0 \text{ эксп}} \pm 600$ Гц; $f_{0 \text{ эксп}} \pm 800$ Гц.

7. Собрать цепь по схеме рис. 8.7. Подключить резистор $R = R_i = 100$ кОм. Снять характеристики $I = F(f)$, $U_2 = F(f)$ в диапазоне от $(f_{0 \text{ эксп}} - 500)$ до $(f_{0 \text{ эксп}} + 500)$ Гц.

Результаты измерений занести в табл. 8.4.

Т а б л и ц а 8.3

Точки	$U_1 = ; L = ; C_1 = ; R = ; R_i = ; Q_{эк} =$						
	По предварительному расчету		Получено при эксперименте				Рассчитано по экспериментальным данным
			$U_2, В$	$R_{ш}, Ом$	$U_I, мВ$	$I, мА$	$B, дБ$
$f_0—500$ $f_0—400$							

Т а б л и ц а 8.4

Точки	$U_1 = ; L = ; C = ; R = ; \rho =$						
	Получено при эксперименте				Рассчитано по экспериментальным данным		
	$f_0 \text{ экп} \pm \Delta f,$ $\Gamma_{ц}$	$U_I, мВ$	$R_{ш}, Ом$	$U_2, В$	Остальные величины	$I, мА$	$Z_{вх}, кОм$ Остальные величины
					в индуктивной ветви $R_{ш} = ;$ $U_{I0} =$		$I_{10} = ; \frac{I_{10}}{I_0} = ;$ $\rho = ;$ $\frac{I_{20}}{I_0} = ; I_{20} =$

Обработка результатов измерений

1. По экспериментальным данным рассчитать действующие значения тока в неразветвленной части цепи I , модуль входного сопротивления $|Z_{вх}|$. Результаты расчетов занести в соответствующие таблицы. Сравнить результаты, полученные экспериментально, с соответствующими результатами, найденными при предварительном расчете.

2. Различными цветами начертить кривые $I = F(f)$; $Z_{вх} = F(f)$ для: а) $R = R_L$; б) $R = (R_L + 100)$ Ом.

3. Начертить кривую $U_2 = F(f)$ для $R_i = 100$ кОм. По полученным экспериментальным данным определить ширину полосы пропускания контура. По резонансным кривым найти добротность $Q_{эк}$. Сравнить с аналогичной величиной, полученной аналитически.

4. По данным табл. 8.4 рассчитать избирательность цепи на всех частотах. Начертить кривую $B = F(f)$ для $R_i = 100$ кОм. (Напомним, что B (дБ) = $20 \lg U_{C0} / U_C$, где U_{C0} , U_C — напряжения на выходе контура соответственно при резонансе и расстройке.)

5. Зная сопротивление резисторов R_3 и R_4 , включенных в индуктивную ветвь, и падение напряжения на них, вычислить ток в индуктивной ветви I_{10} при резонансе.

6. Зная емкостное сопротивление на резонансной частоте (напомним, что $|X_{C0}| = \rho$) и падение напряжения на нем, найти ток в емкостной ветви при резонансе I_{20} для $R = R_L$; $R = R_L + 100$ Ом.

7. Сравнить ток I_{10} с током I_{20} . Рассчитать отношения I_{10}/I_0 , I_{20}/I_0 и КПД схемы при $R = R_L$; $R = R_L + 100$ Ом.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как рассчитать резонансную частоту параллельного контура при: а) малых потерях, б) больших потерях? Начертите векторную диаграмму для токов и напряжений параллельного контура при резонансе и расстройке.

2. Как определить добротность: а) ненагруженного контура; б) нагруженного контура?

3. Как найти входное сопротивление параллельного контура при: а) резонансе; б) расстройке?

4. Составьте схемы замещения параллельного контура. Рассчитайте $r_{эк}$, $x_{эк}$, $Z_{эк}$, постройте соответствующие кривые.

5. Как вычислить токи в ветвях цепи при: а) резонансе; б) расстройке?

6. Нарисуйте кривые $I = F(f)$; $I_1 = F(f)$; $I_2 = F(f)$; $\varphi_{Z_{вх}} = F(f)$; $U_C = F(f)$.

7.* Выразите ток I_0 через токи в ветвях I_{10} и I_{20} , если $f = f_0$.

* Вопросы 7—19 относятся к рис. 8.1.

8. На каких частотах φ_Z равно: а) $+45^\circ$; б) -45° ?

9. На какой частоте $I = \sqrt{1,64} I_0$, если $Q = 20$?

10. Рассчитайте активную мощность, потребляемую контуром при: а) резонансной частоте; б) на граничной частоте.

11. Выразите I_2 через I , при $f = f_0 + \Pi$.

12. Найдите $r_{\text{ЭК}}$ и $x_{\text{ЭК}}$, если $f = f_0 \pm f_0/(2Q)$.

13. Вычислите I/I_0 и I_2/I_0 , если $r_{\text{ЭК}} = |x_{\text{ЭК}}|$.

14. Определите входное сопротивление параллельного контура без потерь при: а) резонансной частоте; б) при расстройке.

15. Как изменятся характеристики контура, если емкость C увеличить в два раза?

16. Какова добротность контура Q , если при $\Delta f = f_0/40$ $Z_{\text{ВХ}} = R_0/1,08$?

17. Каким образом следует изменить сопротивление R_L , чтобы относительная ширина полосы пропускания резонансной кривой: а) увеличилась в два раза; б) уменьшилась в два раза? Как изменится абсолютная ширина полосы пропускания резонансной кривой, если ем-

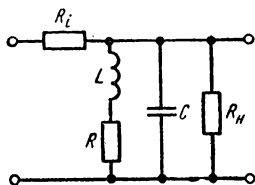


Рис. 8.8

кость контура C : а) увеличить в три раза; б) уменьшить в три раза?

18. Что изменится, если сопротивление R_i : а) увеличить до ∞ ; б) уменьшить до 0?

19. Рассчитайте модуль коэффициента передачи K , если $f = f_0 \pm \Pi$, где: а) Π — ширина полосы пропускания собственно контура; б) Π — ширина полосы пропускания цепи.

20.* Определите модуль коэффициента передачи K при $f = f_0$, если $R_i = 9R_0$.

21. При резонансе $U_{20} = 3,36$ В, а при расстройке $U_2 = 0,04$ В. Выразите избирательность контура на данной частоте в децибелах.

22. Вычислите модуль коэффициента передачи $|K|$ и избирательность B цепи, если $R_i \gg R_0$.

23. На сколько следует расстроить контур, чтобы выходное напряжение уменьшилось в два раза?

24. Как изменится $Q_{\text{ЭК}}$, если сопротивление R_H увеличить в два раза (рис. 8.8)?

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ С НЕПОЛНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ИНДУКТИВНОГО ИЛИ ЕМКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТА

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 3.3; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 9.1; 4) выпол-

* Вопросы 20—23 относятся к рис. 8.5.

нить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Цель работы: изучить входные и передаточные свойства параллельного колебательного контура с неполным включением индуктивного или емкостного элемента.

Параллельный контур, у которого индуктивный (емкостный) элемент распределен между параллельными ветвями, называют контуром с неполным включением (рис. 9.1).

Для более удобного выявления свойств сложного контура, т. е. контура, состоящего из более чем двух разнохарактерных реактивных элементов, будем считать, что потери в контуре отсутствуют и контур является идеальным. В этом случае входное сопротивление может иметь чисто индуктивный или чисто емкостный характер, а аргумент входного сопротивления составляет $+90^\circ$ или -90° . При $R = 0$ никаких промежуточных значений аргумент входного сопротивления принимать не может, поскольку цепь является чисто реактивной. При определении резонансных частот исследуемой цепи запишем выражение для входного сопротивления цепи в виде отношения двух полиномов:

$$\frac{F_1(j\omega)}{F_2(j\omega)}.$$

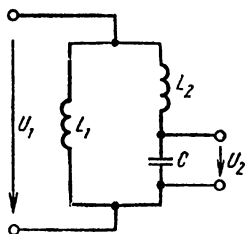


Рис. 9.1

В схеме рис. 9.1 $Z = j \left[\frac{\omega L_1 [\omega L_2 - 1/(\omega C)]}{\omega L_1 + \omega L_2 - 1/(\omega C)} \right]$.

Приравняв нулю числитель данного полинома, найдем частоты, при которых входное сопротивление контура на резонансной частоте равно нулю (резонанс напряжений). Так как частота $\omega = 0$ не является резонансной, то $\omega_{рн} = 1/\sqrt{L_2 C}$. Приравняв нулю знаменатель, получим частоту, на которой входное сопротивление контура бесконечно велико, т. е. определим частоту резонанса токов $\omega_{рт}$: $\omega_{рт} = 1/\sqrt{(L_1 + L_2) C}$. В данной схеме $\omega_{рн} > \omega_{рт}$. Из полученных выражений следует, что в схеме рис. 9.1 частота резонанса токов $\omega_{рт}$ при неполном включении остается такой же, как и при полном (индуктивный элемент находится в одной ветви, а емкостный — в другой), а резонансная частота $\omega_{рн}$ зависит от коэффициента включения индуктивного элемента $p_L = L_1/(L_1 + L_2)$; $\omega_{рн} = \omega_{рт}/\sqrt{1 - p}$. Модуль входного сопротивления контура с неполным включением при небольших расстройках $|Z_{вх(p)}| = p_L^2 Z_{вх} = p_L^2 \frac{Z_{вх(\omega)}}{\sqrt{1 + \xi^2}}$.

Рассмотрим вид входной ФЧХ $\varphi_{вх} = f(\omega)$. На частоте $\omega_{рн} = 1/\sqrt{L_2 C}$ во второй ветви наблюдается резонанс напряжений, следовательно, на частотах $\omega > \omega_{рн}$ эта ветвь имеет индуктивный характер, а при $\omega < \omega_{рн}$ — емкостный. При $\omega > \omega_{рн}$ входное сопротивление цепи имеет индуктивный характер, а аргумент входного сопротивления равен 90° . При частотах $\omega < \omega_{рн}$ первая ветвь обладает индуктивной проводимостью, а вторая — емкостной.

При $\omega < \omega_{PT} = 1/\sqrt{(L_1 + L_2)C}$ входное сопротивление цепи имеет индуктивный характер, а при $\omega_{PH} > \omega > \omega_{PT}$ — емкостный. Таким образом, входная ФЧХ контура (см. рис. 9.1) имеет вид, показанный на рис. 9.2.

Комплексное входное сопротивление цепи при любой частоте

$$Z_{вх} = j\omega \left(\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \right) \left[\frac{\omega^2 - \omega_{PH}^2}{\omega^2 - \omega_{PT}^2} \right].$$

Входная АЧХ контура рис. 9.1 показана на рис. 9.3.

Из приведенных выкладок следует, что рост числа независимо включенных реактивных элементов приводит к увеличению резо-

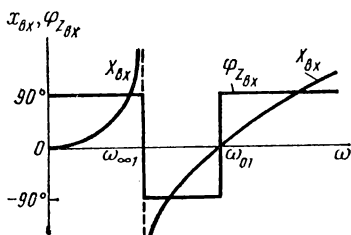


Рис. 9.2

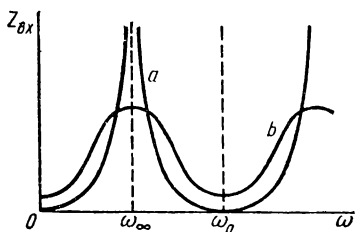


Рис. 9.3

нансных частот. Необходимо учесть, что число резонансных частот в реактивном двухполюснике на единицу меньше числа независимо включенных реактивных элементов цепи; частоты резонансов токов и напряжений чередуются. Так как реальные цепи имеют потери,

то на частотах резонанса напряжения входное сопротивление падает не до нуля, а на частотах резонанса токов увеличивается не до бесконечности. ФЧХ также оказываются сглаженными, причем, чем больше добротность цепи, тем круче идут характеристики, а чем меньше добротность цепи, тем положе (кривые *a*, *b* на рис. 9.3, 9.4). Неполное включение применяют в тех случаях, когда

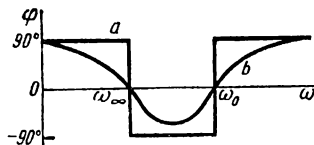


Рис. 9.4

необходимо подключать контур к источнику с недостаточно большим внутренним сопротивлением. Важнейшим свойством контура с неполным включением является способность снижать резонансное сопротивление без расширения полосы пропускания и, следовательно, без ухудшения избирательных свойств цепи. Коэффициент передачи контура по напряжению на резонансной частоте при неполном включении в $1/p_L$ раз больше, чем при полном: $K_{0(p)} = K_0/p_L$.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать резонансные частоты и входное сопротивление на частоте резонанса токов при полном и неполном включении контура (рис. 9.5).

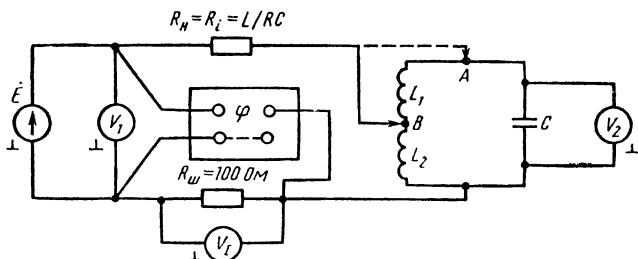


Рис. 9.5

2. Нарисовать примерный вид входных АЧХ и ФЧХ цепи.

Задание. Экспериментально исследовать входные и передаточные характеристики контуров, состоящих из одних и тех же элементов при полном и неполном включении. Сравнить избирательные свойства обоих контуров.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 9.5. Потенциальный зажим генератора подключить к точке А (параллельный контур с полным включением). При всех измерениях поддерживать $U_1 = \text{const}$. Снять входные АЧХ и ФЧХ, а также передаточную АЧХ в диапазоне от $0,75f_0$ до $2f_0$. Результаты измерений занести в табл. 9.1.

2. Переключить потенциальный вывод генератора с точки А в точку В [колебательный контур с неполным (автотрансформаторным) включением]. Снять входные и передаточные характеристики контура.

Таблица 9.1

f, Гц	$R_{ш} = $; $L_1 = $; $L_2 = $; $C = $; $f_{рт} = $; $U_1 = $							
	При полном включении				При неполном включении			
	получено в эксперименте			рассчитано по экспериментальным данным	получено в эксперименте			рассчитано по экспериментальным данным
	U_I , мВ	$\varphi_{вх}$, град	U_2 , В	$Z_{вх}$, Ом	U_I , мВ	$\varphi_{вх}$, град	U_2 , В	$Z_{вх}$, Ом

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать модуль входного сопротивления на всех частотах и построить на одном графике кривые $Z_{вх} = F(f)$ для случаев полного и неполного включения индуктивного элемента.

2. Построить АЧХ передаточных функций для произведенных экспериментов.

3. Построить входные ФЧХ исследуемого контура.

4. Рассчитать эквивалентную добротность и ширину полосы пропускания для обоих случаев.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие контуры называют контурами с неполным включением?

2. Начертите входные АЧХ и ФЧХ для схемы рис. 9.5.

3. Начертите входные АЧХ и ФЧХ для схемы рис. 9.6, если:
а) емкостный элемент C_1 закорочен; б) последовательно с C_1 включена L .

4. Чем отличаются характеристики реального контура от характеристик идеального?

5. Что такое коэффициент включения контура? Для каких целей используют неполное включение контура? Приведите примеры.

6. Как изменяются резонансная частота, добротность, входное сопротивление контура при переносе точки включения катушки (емкости) из одной ветви в другую?

7. Каким образом подсчитывают входное сопротивление контура с неполным включением?

8. Докажите, что в цепи рис. 9.1 $\omega_{рн} = \omega_{рТ} / \sqrt{1 - p_L}$, где $p_L = L_1 / (L_1 + L_2) = L_1 / L$.

9. Известно, что для получения избирательных свойств внутреннее сопротивление источника R_i должно быть много больше входного сопротивления контура R_0 . Как лучше сохранить это соотношение при малых R_i — увеличить резистивную составляющую сопротивления контура или использовать неполное включение и почему?

10. Как определить число резонансных частот в цепи? Приведите примеры.

11. Рассчитайте отношения I_{10}/I_0 и I_{20}/I_0 для цепи рис. 9.6.

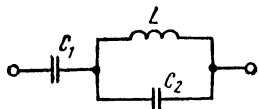


Рис. 9.6

Лабораторная работа № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПОСТОЯННОЙ СВЯЗИ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 3.4; 2) изучить описание данной работы; 3) выполнить предварительный

расчет; 4) заготовить табл. 10.1—10.4; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментально исследовать системы с индуктивной и емкостной связями.

Два контура называются *связанными*, если изменение тока в одном из них вызывает изменение напряжения или тока в другом. Связь между контурами может осуществляться через магнитные или электрические поля катушек или конденсаторов. Вид связи определяется элементом, входящим в оба контура. Взаимное влияние контуров друг на друга характеризуется коэффициентом связи $K_{св} = \sqrt{K_{21}K_{12}}$, где K_{21} — коэффициент передачи по напряжению

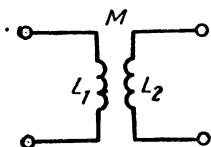


Рис. 10.1

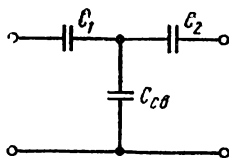


Рис. 10.2

из первичного контура во вторичный; K_{12} — коэффициент передачи из вторичного контура в первичный для цепи, состоящей из элементов, однородных с элементом связи, и работающей в режиме холостого хода. Для схемы рис. 10.1 $K_{св} = M/\sqrt{L_1L_2}$. При $L = L_1 = L_2$ $K_{св} = L/M$. Для схемы рис. 10.2 $K_{св} = \sqrt{\frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_{св})(C_2 + C_{св})}}$.

При $C_1 = C_2 = C$ $K_{св} = C/(C + C_{св})$.

Любую связанную двухконтурную систему вне зависимости от вида связи можно заменить эквивалентной одноконтурной цепью.

Вместо элементов вторичного контура в первичный следует включить элементы $r_{вн1}$ и $x_{вн1}$, на которых при токе I_1 выделяются такая же активная и реактивная мощности, как и на элементах, находящихся во вторичном контуре при токе I_2 , причем $r_{вн1} =$

$$= \frac{x_{св}^2}{Z_{22}^2} r_{22}; \quad x_{вн1} = -\frac{x_{св}^2}{Z_{22}^2} x_{22}, \quad \text{где } x_{св} \text{ — модуль сопротивления свя-}$$

зи между контурами (при трансформаторной связи $x_{св} = \omega M$, при емкостной $x_{св} = 1/(\omega C_{св})$); Z_{22} — модуль сопротивления элементов вторичного контура; r_{22} и x_{22} — резистивная и реактивная составляющие сопротивлений вторичного контура. Реактивная составляющая вносимого сопротивления $x_{вн1}$ характеризует изменение реактивного сопротивления первичного контура за счет элементов вторичного. При трансформаторной связи $x_{вн1}$ показывает размагничивающее действие вторичного контура на первичный за счет тока, протекающего по катушке вторичного контура. Резистивная составляющая вносимого сопротивления $r_{вн1} > 0$, а реактивная составляющая сопротивления имеет знак, противоположный знаку реактивного сопротивления вторичного контура. Следует иметь в виду, что $x_{вн1}$ при индуктивном характере вторичного контура представляет собой не емкостный элемент, а элемент с отрицательной индуктивностью. Частотная характеристика вносимого реактивного сопротивления имеет вид, отличный от частотной характеристики

емкостного элемента* (рис. 10.3). Для измерения индуктивностей или взаимных индуктивностей катушек используют специальные измерительные приборы — мосты переменного тока. Однако подобные мосты достаточно громоздки и по ряду причин малоудобны для лабораторных стендов. Простым, удобным и достаточно точным является метод резонансных измерений. Суть этого метода заключается в том, что последовательно с катушкой, индуктивность которой не-

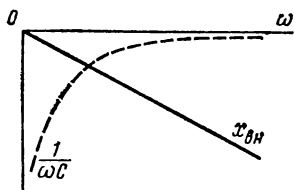


Рис. 10.3

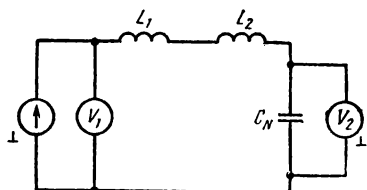


Рис. 10.4

обходимо измерить, включают конденсатор емкостью C_N . Получают колебательный контур, резонансную частоту которого можно определить экспериментально. Зная f_0 и C_N , легко рассчитать L . Измерить взаимную индуктивность M можно двумя способами. При первом способе собирают цепь по схеме рис. 10.4. Резонансную ча-

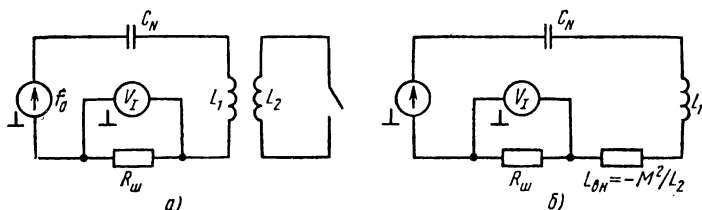


Рис. 10.5

стоту измеряют дважды — один раз при согласном включении катушек ($L_{\text{согл}} = L_1 + L_2 + 2M$); второй раз при встречном ($L_{\text{встр}} = L_1 + L_2 - 2M$).

Так как в данной работе требуется определить только резонансную частоту, то на вход или выход цепи в зависимости от соотношения внутреннего и внешнего резистивных сопротивлений цепи (подробнее см. работу № 7) достаточно подключить один вольтметр. Зная $L_{\text{согл}}$, $L_{\text{встр}}$, находят $M = (L_{\text{согл}} - L_{\text{встр}})/4$; $K_{\text{св}} = M/\sqrt{L_1 L_2}$.

При втором способе собирают цепь по схеме рис. 10.5. Резонансную частоту определяют при разомкнутой и замкнутой катушке L_2 .

При разомкнутой катушке $f_{01} = 1/(2\pi\sqrt{L_1 C_N})$, при замкнутой

* Если бы $x_{\theta H}$ представляла собой емкостный элемент, то можно было бы получить колебательный контур с резонансными явлениями, что в индуктивных цепях невозможно.

$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 - M^2/L_2)C_N}}$ (рис. 10.5, б). Зная L_1 , L_2 , f_{01} , f_{02} ,

рассчитывают $M = \frac{1}{f_{02}} \sqrt{L_1 L_2 (f_{02}^2 - f_{01}^2)}$.

Если $L_1 = L_2 = L$, то $M = \frac{L}{f_{02}} \sqrt{f_{02}^2 - f_{01}^2}$. Так как в этом случае

$K_{св} = M/L$, то $f_{02} = 1/2\pi\sqrt{L(1 - K_{св})C_N}$, откуда $K_{св} =$

$$= \frac{(2\pi f_{02})^2 LC_N - 1}{(2\pi f_{01})^2 LC_N}.$$

Если имеется связанная система, каждый из контуров которой представляет собой колебательный контур добротностью Q , настроенный на резонансную частоту f_0 , то коэффициент связи $K_{св} =$

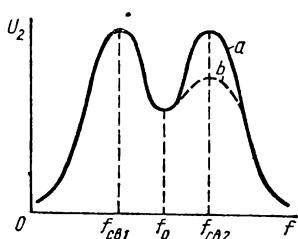


Рис. 10.6

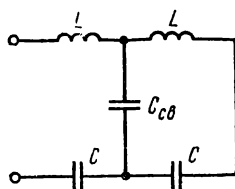


Рис. 10.7

$d = 1/Q$ считают критическим. Связь при $K_{св} < d$ называют слабой, а при $K_{св} > d$ — сильной. При сильной связи входная и передаточная АЧХ имеют вид двугорбых кривых (кривая a на рис. 10.6). Частоты $f_{св1}$ и $f_{св2}$ называют нижней и верхней частотами связи. При сильной индуктивной связи $f_{св1,2} \approx f_0/\sqrt{1 \pm K}$, при сильной емкостной связи $f_{св1,2} \approx f_0\sqrt{1 \mp K}$. У одинаковых контуров амплитуды токов на частотах связи одинаковы, а амплитуды напряжений различны, поскольку $U_{C2} = I_2 \frac{1}{\omega C}$, $\omega_{св2} > \omega_{св1}$ (кривая b на рис. 10.6).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

Рассчитать коэффициент связи $K_{св}$, резонансную частоту f_0 и частоты связи $f_{св1}$, $f_{св2}$ для схемы рис. 10.7. Исходные данные определяются вариантом стенда.

Задание. Экспериментально измерить индуктивности катушек L_2 и L_3 , взаимную индуктивность M , резистивную и реактивную составляющие вносимого сопротивления. Снять АЧХ связанных контуров с индуктивной и емкостной связями при связи больше критической.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 10.8 (катушка L_2 остается невключенной).
2. Изменяя частоту генератора, найти резонансную частоту f_0 . Показания приборов занести в табл. 10.1.

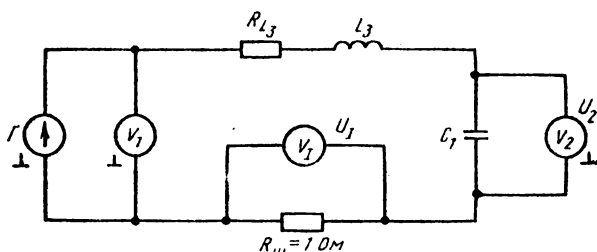


Рис. 10.8

3. Вместо катушки L_3 включить катушку L_2 (катушка L_3 остается разомкнутой). Определить резонансную частоту.

4. Вместо катушки L_2 включить катушки L_2 и L_3 , соединенные последовательно. Измерить резонансную частоту.

5. Выводы катушки L_3 поменять местами. Измерить резонансную частоту.

6. Собрать цепь по схеме рис. 10.9, а. Катушку L_3 замкнуть накоротко. Эквивалентная схема цепи показана на рис. 10.9, б ($r_{вн}$ полагаем малым). Определить резонансную частоту.

7. Замкнуть катушку L_3 на резистор $R_3 = 300 \div 500$ Ом. В этом случае $x_{вн}$ пренебрежимо мало, так как $Z_2 \gg X_2$, а $r_{вн}$ достаточно велико. Эквивалентная схема цепи представлена на рис. 10.9, в. Из-за вносимого сопротивления $r_{вн}$ добротность контура уменьшается. Занести показания приборов в табл. 10.1.

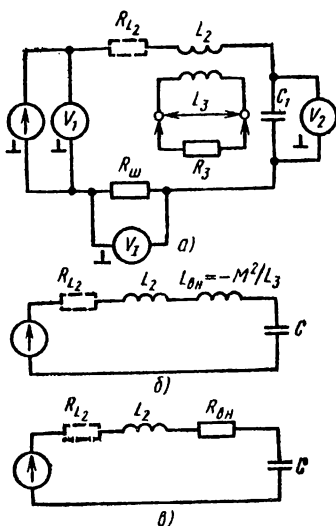


Рис. 10.9

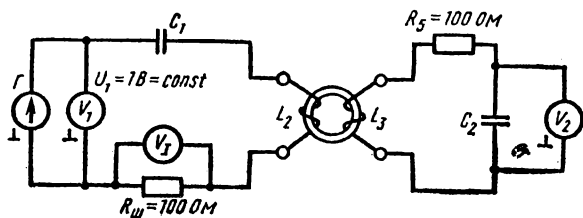


Рис. 10.10

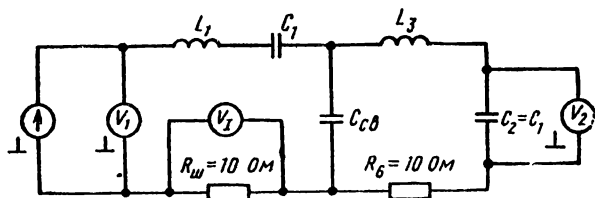


Рис. 10.11

8. Собрать цепь по схеме рис. 10.10. Снять входную и передаточную АЧХ цепи. Результаты измерений занести в табл. 10.2.

9. Собрать цепь по схеме рис. 10.11 (катушка L_2 остается разомкнутой). Снять характеристики $I_1 = F(f)$, $U_2 = F(f)$ в диапазоне от $0,5f_1$ до $1,5f_2$, где f_1 и f_2 — частоты связи, полученные при предварительном расчете.

Таблица 10.1

Измеряемая величина	Измерено при $U_1 = 1B$, $C_1 =$				Рассчитано по экспериментальным данным	
	U_2 , В	$R_{ш}$, Ом	U_I , В	f_0 , Гц	L , мГн	R_L , Ом
L_2						
L_1						
$L_2 + L_3$ (при согласном включении)						
$L_2 + L_3$ (при встречном включении)						
$L_2 - L_{вн}$ (при закорачивании R_3)						
L_2 (при L_3 замкнутой на R_3)						

Таблица 10.2

f, Гц	U ₁ =						Остальные величины
	Измерено			Вычислено			
	R _ш , Ом	U _I , мВ	U ₂ , В	X ₁ , Ом	X _C , Ом	I ₂ , мА	
							Q = ; d = ; K _{св.кр} = ; f ₀ = ; f ₁ = ; f ₂ =

Таблица 10.3

$L_{согл} = L_2 +$ $+ L_3 + 2M$, мГн	$L_{встр} = L_2 +$ $+ L_3 - 2M$, мГн	M, мГн	K _{св}

Таблица 10.4

f, Гц	U ₁ =						Рассчитано теоретически
	Измерено			Рассчитано по эксперименталь- ным данным			
	R _ш , Ом	U _I , мВ	U _{C₂} , В	I, мА	Осталь- ные величины		
					f ₀ ==; f ₁ ==; f ₂ ==	f ₀ ==; K _{св} == f ₁ ==; f ₂ ==	

Обработка результатов измерений.

1. По результатам эксперимента, произведенного согласно п. 2 порядка выполнения работы, зная f_0 , C_1 , рассчитать индуктивность катушки L_3 при разомкнутой катушке L_2 . Так как $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, то $L_3 = 1/(4\pi^2 f_0^2 C_1)$.

2. Определить резистивную составляющую входного сопротивления катушки L_3 : $R_{L_3} = \frac{U_1}{I} - R_{ш} = (U_1/U_I - 1) R_{ш}$.

3. По результатам эксперимента, выполненного согласно п. 3 порядка выполнения работы, найти индуктивность катушки L_2 и сопротивление катушки R_{L_2} (при разомкнутой катушке L_3).

4. Вычислить индуктивности катушек L_2 и L_3 по результатам эксперимента, выполненного в соответствии с п. 4 порядка выполнения работы, при согласном $L_{\text{согл}}$, а по результатам п. 5 — при их встречном $L_{\text{встр}}$ включении.

5. Рассчитать взаимную индуктивность $M = (L_{\text{согл}} - L_{\text{встр}})/4$ и коэффициент связи $K_{\text{св}} = M/\sqrt{L_1 L_2}$ (табл. 10.3).

6. По данным п. 6 и 7 порядка выполнения работы определить резонансные частоты. Сравнить эти частоты. Рассчитать вносимую отрицательную индуктивность в соответствии с п. 6 (рис. 10.9, а, б).

7. Согласно данным п. 8 порядка выполнения работы, построить кривые $I_1 = F(f)$, $U_2 = F(f)$.

8. По данным п. 9 порядка выполнения работы построить кривые $I_1 = F(f)$, $U_2 = F(f)$, $I_2 = F(f)$, причем $I_2 = U_2/\omega C$. Сравнить значения коэффициента связи $K_{\text{св}}$, полученные в эксперименте, с аналогичными результатами, найденными при предварительном расчете.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие контуры называют связанными? Чем они отличаются от одиночных контуров? Каким образом определяют вид связи?

2. Как рассчитать коэффициент связи $K_{\text{св}}$ в различных цепях? Приведите примеры.

3. Как заменить двухконтурную схему эквивалентной одноконтурной? Как найти $r_{\text{вн1}}$ и $x_{\text{вн1}}$?

4. Каков физический смысл сопротивлений $r_{\text{вн1}}$ и $x_{\text{вн1}}$?

5. Определите $L_{\text{ЭК}}$ в схеме рис. 10.5, а.

6. Во сколько раз изменится показание прибора V_1 в схеме рис. 10.5, а, если коэффициент связи $K_{\text{св}}$ уменьшится в два раза?

7. Как вычислить резонансную частоту цепи рис. 10.5, а при разомкнутых и замкнутых вторичных зажимах?

8. К первичной обмотке воздушного трансформатора, работающего в режиме холостого хода, приложено напряжение $u = U_m \cos \omega t$.

Определить мгновенное, действующее, комплексное напряжения на зажимах вторичной обмотки.

9. Какой вид имеет АЧХ системы связанных контуров при сильной связи?

10. Как подсчитать частоты связи при индуктивной и емкостной связях?

11. Подсчитайте резонансную частоту для схемы рис. 10.7, если $L_1 = L_2 = L$; $C_1 = C_2 = C$.

12. Как изменится коэффициент связи $K_{св}$ (рис. 10.7) при $C_{св} = 0 \div \infty$?

13. Скажется ли на виде АЧХ изменение измерительных сопротивлений в схемах рис. 10.10 и 10.11? Если скажется, то каким образом?

14. В схеме рис. 10.9, а катушка L_3 разомкнута. Как изменятся показания приборов, если катушку L_3 замкнуть накоротко или подключить резистор?

15. Как изменятся показания приборов в схеме рис. 10.9, а, если входное напряжение увеличить в два раза?

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ СВЯЗИ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 3.4; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 11.1—11.6; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментально исследовать входные АЧХ и ФЧХ, а также передаточные АЧХ связанных контуров при различных значениях параметра связи.

Для исследования входных АЧХ связанных систем двухконтурную цепь (рис. 11.1, а) удобно заменить эквивалентной одноконтурной (рис. 11.1, б). Если оба контура настроены в резонанс, а связь между контурами произвольна, то такой резонанс называют индивидуальным или основным. При основном резонансе $r_{вн1} \neq r_{11}$; $x_{11} = 0$; $x_{22} = 0$; $x_{вн} = 0$. Если контуры настроены, а связь выбрана такой, при которой $r_{вн1} = r_{11}$, то резонанс называют полным, а связь — критической (оптимальной).

Критическая связь $K_{св.кр}$ — это самая малая связь, при которой во вторичном контуре можно получить наибольший ток $I_{2m} = U_1 / (2 \sqrt{r_{11} r_{22}})$, где r_{11} и r_{22} — резистивные составляющие собственных сопротивлений первичного и вторичного контуров.

Для упрощения расчетов и экспериментов в данной работе будем исследовать связанные системы с одинаковыми контурами. При полном резонансе $M_{полн} = R/\omega$; $K_{св.кр} = d = 1/Q$.

Для различных контуров $K_{\text{св.кр}} = \sqrt{d_1 d_2}$. Степень связи между контурами оценивают параметром связи

$$A = \frac{|x_{12}|}{\sqrt{r_{11} r_{22}}} = \frac{K_{\text{св}}}{K_{\text{св.кр}}} = K_{\text{св}} Q.$$

При критической связи $A = 1$, в несвязанных цепях $A = 0$. Если коэффициент связи превышает критическую связь в 2,41 раза и более, то полоса пропускания связанной системы распадается на две. Таким образом, в реальных устройствах параметр $A = 0,5 \div 2,4$.

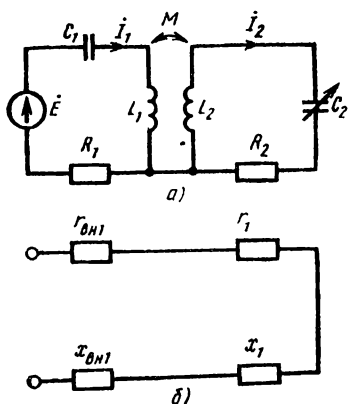


Рис. 11.1

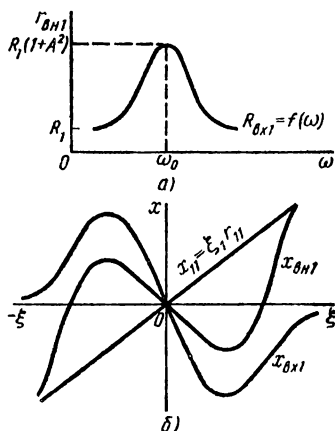


Рис. 11.2

Вносимые сопротивления $r_{\text{вн1}}$ и $x_{\text{вн1}}$ удобно выражать через добротность Q , обобщенную расстройку ξ и параметр связи A :

$$r_{\text{вн1}} = \frac{x_{12}^2}{Z_{12}^2 r_{22}} = \frac{R_1 A^2}{1 + \xi_{22}^2}; \quad x_{\text{вн1}} = -\frac{x_{12}^2}{Z_{22}^2 x_{22}} = -r_{11} \frac{\xi_{22} A^2}{1 + \xi_{22}^2}.$$

Резистивная и реактивная составляющие входного сопротивления системы $r_{\text{вх1}} = r_{11} + r_{\text{вн1}} = R_1 \left(1 + \frac{A^2}{1 + \xi_{22}^2} \right);$ $x_{\text{вх1}} = x_{11} + x_{\text{вн1}} =$

$$= \xi_{11} r_{11} \left(1 - \frac{A^2}{1 + \xi_{22}^2} \frac{\xi_{22}}{\xi_{11}} \right).$$

Кривые $r_{\text{вн1}} = f(\omega)$; $x_{\text{вн1}} = f(\omega)$ для $A > 1$ показаны на рис. 11.2, а, б. Входную ФЧХ $\varphi_{Z_{\text{вх}}} = f(\xi)$ при одинаковых контурах определяют из выражения

$$\varphi_{Z_{\text{вх}}} = \arctg \left[\frac{x_{11} + x_{\text{вн1}}}{r_{11} + r_{\text{вн1}}} \right] = \arctg \left[\frac{\xi (1 + \xi^2 - A^2)}{(1 + \xi^2 + A^2)} \right].$$

Так как знак резистивной составляющей входного сопротивления всегда положительный, а реактивной может быть и положительным и отрицательным, то знак аргумента комплексного входного сопротивления меняется в соответствии с изменением реактивного со-

противления (рис. 11.3). Аргумент входного сопротивления $\varphi_{Z_{вх}} = f(\omega)$ связанной системы меняется в пределах от -90° до $+90^\circ$, т. е. так же, как у одиночного контура. Но вид входной ФЧХ этих цепей различен: ФЧХ одиночного контура пересекает горизонтальную ось только в одной точке (на резонансной частоте), а ФЧХ связанной системы — в трех ($\xi_1 = -\sqrt{A^2 - 1}$; $\xi = 0$; $\xi_2 = +\sqrt{A^2 - 1}$). Различие тем заметнее, чем сильнее связь между

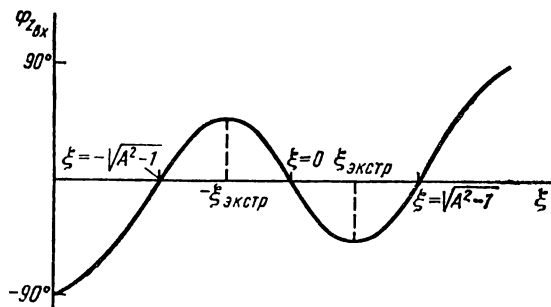


Рис. 11.3

контурами. Экстремальные значения кривой получают при $\xi_{экстр} = \pm \sqrt{-(2A^2 + 1) + A\sqrt{5A^2 + 4}}$. Например, при связи в два раза больше критической $\xi_{12} = \pm 1,73$; $\xi_{экстр} = \pm 0,775$.

Комплексная передаточная функция по напряжению $K(j\omega) = \frac{AQ}{A^2 + 1 - \xi^2 + j2\xi}$, а ее модуль $K(\omega) = \frac{AQ}{\sqrt{(A^2 + 1)^2 - 2\xi^2(A^2 - 1) + \xi^4}}$. При $A = 1$ последнее выражение

приобретает вид $K_{кр}(\omega) = Q/\sqrt{4 + \xi^4}$. При этом коэффициент передачи на резонансной частоте равен $Q/2$. Если связь меньше критической, то передаточная АЧХ имеет вид одnogорбой кривой, а если связь больше критической — двугорбой (рис. 11.4). При $A = 2,41$ седловина на резонансной частоте опускается до уровня 0,707. С увеличением связи полоса пропускания расширяется. В общем случае

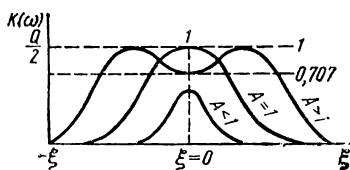


Рис. 11.4

граничные частоты находят из выражения $\frac{K(\omega)}{K_{\max}(\omega)} = 1/\sqrt{2}$, причем при $A \geq 1$ $\xi_{гр} = \sqrt{A^2 + 2A - 1}$. При $A = 1$ $\xi_{гр} = 1,41$, т. е. полоса пропускания в $\sqrt{2}$ раз больше, чем у одиночного контура при той же добротности. При $A = 2,41$ $\xi_{гр} = 3,1$. На частотах связи расстройка $\xi_{св} = \sqrt{A^2 - 1}$, входное сопротивление системы имеет чисто резистивный характер. Если первичный контур настроен в

резонанс ($\xi_1 = 0$), а емкость вторичного контура меняется ($\xi_2 = \text{var}$), то ток во вторичном контуре

$$I_2 (\xi_1 = 0) = \frac{U_1 A}{R_1 \sqrt{A^4 + 2A^2 + (1 + \xi_2^2)}}.$$

При критической связи

$$I_{2 \text{ кр}} (\xi_1 = 0) = \frac{U_1}{R_1 \sqrt{4 + \left(\frac{\Delta C_2}{C_{20}} Q \right)^2}},$$

где C_{20} — емкость вторичного контура при резонансе; $\Delta C = C_2 - C_{20}$ — изменение емкости вторичного контура. Аналогично, $U_2 =$

$$= \frac{QU_1}{\sqrt{4 + \left(\frac{\Delta C_2}{C_{20}} \right)^2}}.$$

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать резонансную частоту контура f_0 , состоящего из катушки L_6 и конденсатора C_6 .

2. Определить частоты, при которых обобщенная расстройка: а) $\xi = 0; \pm 0,5\xi_{\text{гр}}; \xi_{\text{гр}}; \pm 1,5\xi_{\text{гр}}; \pm 2\xi_{\text{гр}}; \pm 2,5\xi_{\text{гр}}$, если $A = 1$; б) $\xi = \xi_0; \pm 0,5\xi_{\text{св}}; \pm \xi_{\text{св}}; \pm \xi_{\text{гр}}; \pm 1,3\xi_{\text{гр}}; \pm 1,6\xi_{\text{гр}}$, если $A = 2,41$; в) $\xi = \xi_0; \xi_{\text{гр}}; \pm 2\xi_{\text{гр}}; \pm 3\xi_{\text{гр}}$, если $A = 0,5$.

3. Вычислить коэффициент передачи по напряжению $K(\omega)$ и напряжение на выходе U_2 для схемы рис. 11.7. на частотах, рассчитанных в п. 2, если $U_1 = 2,5$ В (при определении добротности контура не забывайте учесть сопротивление измерительного резистора $R_{\text{ш}} = 10$ Ом). Результаты расчетов занести в табл. 11.1.

4. Найти действующие значения тока в первичном контуре I_1 и напряжения U_2 , если первичный контур настроен в резонанс, связь критическая, а емкость вторичного контура изменяется от C_{20} до $(C_{20} \pm 250)$ пФ через каждые 50 пФ. Результаты расчетов занести в табл. 11.2.

Задание. Определить зависимость коэффициента связи от расстояния между катушками: $K_{\text{св}} = f(l)$. Исследовать характеристику $U_2 = f(K_{\text{св}})$ при основном и полном резонансах. Снять характеристики $I_1 = f(C_2)$; $U_2 = f(C_2)$, а также характеристики $I_1 = F(f)$ и $U_2 = F(f)$ при $K_{\text{св}} = K_{\text{св.кр}} (A = 1)$; $K_{\text{св}} > K_{\text{св.кр}} (A > 1)$; $K_{\text{св}} < K_{\text{св.кр}} (A < 1)$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Экспериментально определить коэффициент связи $K_{св}$ в зависимости от расстояния между центрами катушек l . Для этого собрать цепь по схеме рис. 11.5, а. Регуляторы генератора установить в такие позиции, при которых $f = 150$ кГц; $U_1 = 10$ В. Изменять расстояния между ка-

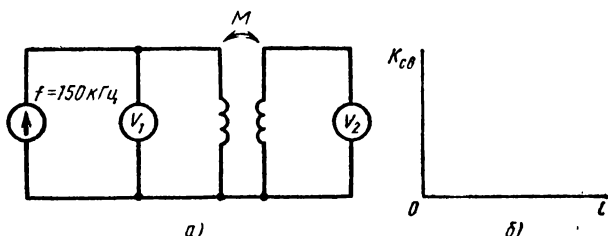


Рис. 11.5

тушками и записывать показания вольтметра U_2 для $l = 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80$ мм. Результаты измерений занести в табл. 16.3.

2. Рассчитать коэффициент связи $K_{св}$ для измеренных точек. Полученные результаты занести в табл. 11.3 и построить соответствующую кривую (рис. 11.5, б). Так как обе катушки одинаковы, то коэффициент связи численно равен коэффициенту передачи, т. е. $K_{св} = U_2/U_1$. Например, если $U_1 = 10$ В, $U_2 = 0,5$ В, то при данном расстоянии $K_{св} = 0,5/10 = 0,05 = 5\%$. Кривой $K_{св} = f(l)$ следует пользоваться при выполнении последующих экспериментов.

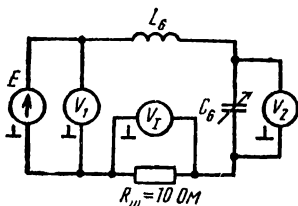


Рис. 11.6

3. Собрать цепь по схеме рис. 11.6. Регуляторы генератора установить в позиции, при которых получается частота, рассчитанная в п. 1 предварительного расчета. Установить $R_{ш} = 10$ Ом, поддерживать $U_1 = 2,5$ В. Изменяя C_6 , найти такое положение, при котором вольтметр V_2 покажет наибольшее напряжение. Получившаяся в эксперименте емкость должна оказаться близкой к емкости C_6 . По показаниям вольтметра V_1 рассчитать добротность Q и затухание d контура $L_6 C_6$. Очевидно, что $Q_1 = U_{20}/U_1$; $d_1 = U_1/U_{20}$. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 11.4. После произведенного эксперимента емкость C_6 и частоту генератора не изменять.

4. Уменьшить выходное напряжение генератора до нуля. Вместо катушки L_6 подключить катушку L_7 , а вместо конденсатора C_6 — конденсатор C_7 . Снова установить $U_1 = 2,5$ В. Изменяя емкость C_7 , добиться резонанса в контуре L_7C_7 . При этом следует помнить, что вследствие небольших различий в катушках (погрешности градуировки, влияние входных емкостей приборов и т. д.) емкость C_{70} может незначительно отличаться от емкости C_{60} . Рассчитать Q_2 и d_2 . Результаты измерений занести в табл. 11.5.

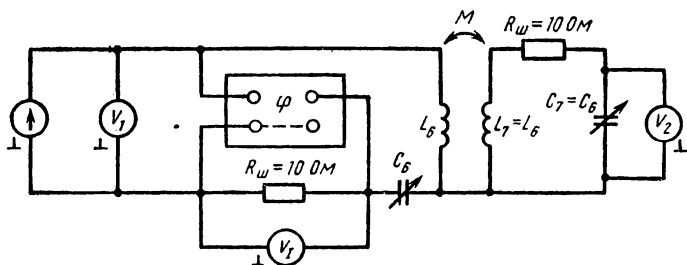


Рис. 11.7

5. Найти $K_{св}$ при критической связи. Для одинаковых контуров $K_{св.кр} = d$. Если контуры имеют различные затухания, то $K_{св.кр} = \sqrt{d_1 d_2}$. По кривой $K_{св} = f(l)$ определить расстояние, при котором связь будет критической.

6. Собрать цепь по схеме рис. 11.7. Снять характеристики $I_1 = f(K_{св})$; $U_2 = f(K_{св})$ при $U_1 = 2,5$ В = const; $C_6 = C_{60}$, $C_7 = C_{70}$. Установить между катушками расстояния, указанные в п. 1. Выполнить эксперименты при $K_{св} = K_{св.кр}$. Так как оба контура порознь настроены в резонанс, то при связи, отличной от критической, будет иметь место основной резонанс и ток I_2 , а следовательно, и U_2 (при $\omega = \text{const}$ $U_2 \approx I_2$) будет меньше максимально возможного тока I_{2mm} ($U_2 < U_{2m}$) как при $K_{св} > K_{св.кр}$, так и при $K_{св} < K_{св.кр}$. Очевидно, что при этом коэффициент передачи также меньше $Q/2$. Убедиться, что при настроенных контурах аргумент входного сопротивления равен нулю. При $K_{св} = K_{св.кр}$ имеет место полный резонанс: $I_2 = I_{2mm} = U_1/(2R)$; $U_2 = U_1 Q/2$, где Q — добротность каждого контура. Результаты измерений занести в табл. 11.6.

7. Снять зависимости $I_1 = f(C_2)$; $\varphi_{вх} = f(C_2)$; $U_2 = f(C_2)$ при $K_{св} = K_{св.кр}$; $U_1 = 2,5$ В. Емкость C изменять на ± 250 пФ через каждые 50 пФ. Результаты измерений занести в табл. 11.2.

8. Установить $C_6 = C_{60}$; $C_7 = C_{70}$; $K_{св} = K_{св.кр}$; $U_1 = 2,5$ В. При этом выполняется условие полного резонанса. Снять $I_1 = F(f)$; $\varphi_{Z_{вх}} = F(f)$; $U_2 = F(f)$. Установить частоты, получившиеся в п. 2 предварительного расчета. Результаты измерений занести в табл. 11.1.

9. Снять характеристики $I_1 = F(f)$; $\varphi_{Z_{вх}} = F(f)$; $U_2 = F(f)$ для $A = 2,41$; $0,5$. Установить частоты, получившиеся в п. 2 предварительного расчета.

Таблица 11.1

$L_6=L_7=$; $C_6=C_7=$; $R_{ш1}=R_{ш2}=10$ Ом $U_1=2,5$ В												
По предварительному расчету							Получено при эксперименте			Рассчитано по экспериментальным данным		
A	ξ (в общем виде)	ξ (числовые значения)	Δf_0 , кГц	f , кГц	$K(\omega)$	U_2 , В	U_I , мВ	U_2 , В	$\varphi_{Z_{вх}}$, град	X_C , Ом	I_1 , мА	I_2 , мА

Таблица 11.2

C_2 , пФ	$U_1 =$							
	По предварительному расчету		Получено при эксперименте		Рассчитано по экспериментальным данным			
	I_1 , мА	U_2 , В	U_I , мВ	U_2 , В	X_C , Ом	I_1 , мА	I_2 , мА	

Таблица 11.3

$f = 150$ кГц; $U = 10$ В			
l , мм	U_1 , В	$K_{св}$	$K_{св}$, %
2 0			
2 5			
...			

Таблица 11.4

$L_6 =$; $f_0 =$; $U_1 = 2,5$ В				
По предварительному расчету C_{60} , пФ	По экспериментальным данным C_{60} эксп, пФ	U_{20} , В	$Q = \frac{U_{20}}{U_1}$	$d = \frac{U_1}{U_{20}}$

Таблица 11.5

$L_7 =$; $f_0 =$; $U_1 = 2,5$ В			
C_{70} эксп. пФ	U_2 , В	$Q = U_{20}/U_1$	$d = U_1/U_{20}$

Таблица 11.6

$L_6 =$; $C_6 =$; $L_7 =$; $C_7 =$; $R_{ш1} = R_{ш2} = 10$ Ом $U_1 = 2,5$ В; $f_0 =$						
l , мм	$K_{св}$	Получено в эксперименте		Рассчитано по экспериментальным данным		
		U_1 , мВ	U_2 , В	X_C , Ом	I_1 , мА	I_2 , мА

Обработка результатов измерений

1. По данным, полученным в п. 6 выполнения работы, построить кривые $I_1 = f(K)$ и $I_2 = f(K)$ при $U_1 = \text{const}$. Зная L_6 , L_7 , рассчитать взаимную индуктивность M для каждого значения $K_{св}$. На оси ординат нанести значения $K_{св}$ и M . По данным, полученным в п. 7 порядка выполнения работы, построить кривые $I_1 = f(C_2)$; $I_2 = f(C_2)$; $\varphi_{z_{вх}} = f(C_2)$.

2. По данным, полученным в п. 8—9 порядка выполнения работы, построить кривые $I_1 = F(f)$; $U_2 = F(f)$; $\varphi_{z_{вх}} = F(f)$ при различных значениях $K_{св}$.

3. По данным, полученным в п. 3 порядка выполнения работы, рассчитать резистивную составляющую сопротив-

ления каждого контура, сравнить значения тока I_2 при полном резонансе со значением $U_1/(2\sqrt{R_1 R_2})$ [при $R_1 = R_2 = R$ с $U_1/(2R)$].

4. Сравнить коэффициент передачи при полном резонансе, получившийся в эксперименте, со значением $Q/2$.

5. Рассчитать частоты связи $f_{св1}$ и $f_{св2}$ для $K_{св} = 2,41 \times K_{св.кр.}$ и полученные результаты сравнить с результатами, найденными экспериментально в п. 9.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие виды резонансов в связанных системах вы знаете? При каком условии имеет место сложный резонанс? Как подсчитать при этом ток вторичного контура?

2. Как произвести настройку на полный резонанс? Какой при этом требуется коэффициент связи? Рассчитайте действующее значение токов в первичных и вторичных контурах.

3. Какую связь называют критической? Как рассчитать критическую связь между двумя контурами? Рассчитайте модуль коэффициента передачи при критической связи.

4. Определите токи в первичном и вторичном контурах при индивидуальном (основном) резонансе.

5. Что понимают под параметром связи A ? Выразите $r_{вн}$ и $x_{вн}$ через A и ξ .

6. Как экспериментально определить коэффициент связи между двумя катушками? Изменится ли $K_{св}$, если последовательно с индуктивными элементами (рис. 11.5, а) включить емкостные элементы: а) одинаковые; б) разные? Зависит ли $K_{св}$ в данной схеме от частоты?

7. Начертите кривую $U_2 = f(K_{св})$ (по схеме рис. 11.1), если контуры настроены в резонанс, а к входу первичного контура подключен источник тока.

8. Подсчитайте ξ при: а) $\omega = 0$; б) $\omega = \omega_0$; в) $\omega \rightarrow \infty$. Как изменятся $R_{вх}$ и ток первичного контура, если контуры настроены в резонанс, а коэффициент связи (параметр связи) изменяется?

9. Напишите выражение для тока первичного контура при $A = 1$, настроенном первичном контуре и изменении емкости вторичного контура. Постройте кривую $I_1 = f(C_2)$. Как определить напряжение U_2 при настроенном первичном контуре и критической связи? Постройте кривую $U_2 = f(C_2)$.

10. Какой вид имеет передаточная АЧХ при связи больше критической? Как подсчитать частоты связи?

11. Найдите $\xi_{гр}$ и $\xi_{св}$ при $A > 1$.

12. Объясните ход кривых $r_{вн1} = f(\omega)$; $x_{11} = f(\omega)$; $x_{вн1} = f(\omega)$. Определите входную ФЧХ и построьте кривые $\varphi_{Z_{вх}} = f(\xi)$ при различных связях. Как изменяется модуль входного сопротивления двухконтурной схемы в зависимости от частоты (растройки)?

13. Докажите, что АЧХ тока первичного контура при $A < 0,49$ является одnogорбой, а при $A > 0,49$ — двугорбой.

14. Как определить ширину полосы пропускания связанных контуров при: а) $A < 1$; б) $A = 1$; в) $A > 1$?

15. Какую избирательность обеспечивает связанная система, при $\Delta f = 50$ кГц; если $L_6 = L_7 = L = 1$ мГн; $C_6 = C_7 = C = 1000$ пФ; $R_1 = R_2 = 50$ Ом?

16. В схеме рис. 11.1 $E = 2,5$ В; $L_1 = L_2 = L = 1$ мГн; $C = 1000$ пФ; $R_1 = R_2 = 50$ Ом; $A=1$, aC_2 имеет такое значение, при котором вторичный контур настроен на граничную частоту. Определите мощность, рассеиваемую на R_2 .

17. Перечислите достоинства и недостатки связанной системы по сравнению с одиночным контуром.

Лабораторная работа № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ НАЛОЖЕНИЯ

При подготовке к выполнению лабораторной работы № 12 необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 4.2; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 4.1; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментально убедиться в справедливости принципа наложения для линейных резистивных цепей. Приобрести навыки в калибровке осциллографа.

Метод наложения применим только для расчета линейных цепей, т. е. таких цепей, параметры элементов которых не зависят от значений протекающего тока или приложенного напряжения.

Для расчета цепей методом наложения составляют столько частных схем, сколько независимых источников имеет исходная цепь, причем в каждой частной схеме оставляется только один независимый источник, все остальные исключают. Зависимые источники исключают только в том случае, когда управляющие ими напряжения или токи принимают нулевые значения. Результирующий ток в каждой ветви равен алгебраической сумме частичных токов, вызванных действием каждого источника в отдельности. При исключении идеальных источников напряжения вместо источника ставится короткозамкнутая перемычка, что соответствует ЭДС, равной нулю при нулевом внутреннем сопротивлении. Ветвь с источником тока, наоборот, размыкается, что соответствует нулевому току при нулевой проводимости.

При расчете частных схем принято токи, протекающие в ветвях, обозначать двумя индексами. Нижний индекс показывает номер ветви, в которой определяют ток, а верхний — номер источника, действием которого вызывается ток. Например, $I_1^{(3)}$ — ток первой ветви, вызываемый действием третьего источника. При расчете частных схем часто приходится рассчитывать токи в параллельных ветвях (рис. 12.1). Напомним, что в таких цепях $i_1 = i \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$,

$i_2 = i \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$. Для нахождения токов в схеме рис. 12.2 методом

наложения определяют токи в частных схемах, приведенных на рис. 12.3 и 12.4. Для схемы рис. 12.3

$$j_2^{(1)} = I_1^{(1)} \frac{E}{R_{i1} + R_1 + R_2}; \quad I_3^{(1)} = 0,$$

для схемы рис. 12.4.

$$j_3^{(2)} = j; \quad j_2^{(2)} = j \frac{R_1 + R_{i1}}{R_{i1} + R_1 + R_2};$$

$$j_1^{(2)} = j \frac{R_2}{R_{i1} + R_1 + R_2}; \quad i_1 = j_1^{(1)} - j_1^{(2)} = \frac{\dot{E} - jR_2}{R_{i1} + R_1 + R_2};$$

$$i_2 = j_2^{(1)} + j_2^{(2)} = \frac{\dot{E} + j(R_1 + R_{i1})}{R_{i1} + R_1 + R_2}; \quad i_3 = j.$$

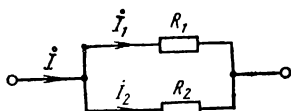


Рис. 12.1

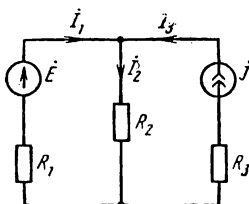


Рис. 12.2

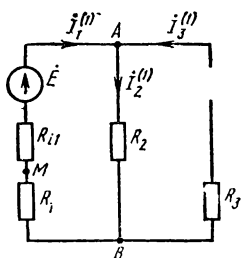


Рис. 12.3

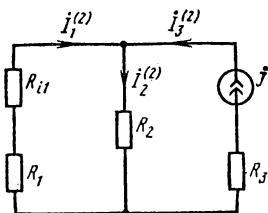


Рис. 12.4

Измерение напряжений с помощью осциллографа. Определить направления токов ветвей можно с помощью осциллографа. Делают это следующим образом. Собирают цепь с одним источником, при этом направления токов в ветвях будут вполне определенными. Например, в схеме рис. 12.3 в резисторе R_2 ток течет от точки A к точке B , а в резисторе R_1 — от B к M . Осциллограф подключают параллельно одному из резисторов, например R_2 , причем потенциальным выводом к точке, из которой ток вытекает (в данном случае точке A), а корпусным к точке, в которую ток втекает (точка B). На экране осциллографа возникает кривая синусоидальной формы. Регуляторы «Усиление вертикального канала» и «Развертка» устанавливают в такие положения, при которых на экране укладывается 2—3 периода синусоиды при оптимальном размере по вертикали. Перемещая изображение вправо—влево, находят такое положение,

при котором одно из максимальных значений синусоиды совпадает с определенной вертикальной линией сетки экрана.

Так как цепь состоит только из резистивных элементов, то при подключении осциллографа к различным точкам цепи на выбранной вертикали может оказаться либо максимум, либо минимум синусоиды, никаких иных изображений на экране быть не может. Чтобы определить направление тока в каком-либо резисторе, осциллограф следует подключить параллельно ему и зарисовать получившееся изображение. Если синусоида на выбранной вертикали будет иметь максимум, то ток в данном резисторе течет от точки, к которой подключен потенциальный вывод осциллографа, к точке с корпусным выводом, а если минимум, то наоборот. С помощью осциллографа можно также измерить напряжение на зажимах цепи, к которой подключен осциллограф. Для этого осциллограф необходимо предварительно откалибровать, т. е. определить цену деления клетки при данном положении регуляторов усиления. Калибровку можно выполнить несколькими способами. Разберем наиболее употребительные из них.

Способ первый. К генератору с напряжением синусоидальной формы подключают вольтметр, измеряющий действующее значение напряжения, и осциллограф. Зная действующее значение напряжения U и число клеток, занимаемых изображением данного напряжения на экране, рассчитывают максимальное значение $U_m = 1,41U$ и размах напряжения $U_p = 2U_m = 2,82U$, после чего определяют цену деления клетки.

Например, вольтметр, подключенный к генератору сигналов синусоидальной формы, показывает 3,5 В, а изображение синусоиды на экране занимает 10 кл. Определим цену деления клетки. Так как при сигналах гармонической формы $U_p = 2,82U = 10$ В, то цена деления клетки составляет 1 В/кл. При измерениях в цепях с сигналами различных форм поступать следует указанным способом: с помощью сигнала, у которого точно известно отношение U_p/U , определить цену деления клетки, а затем измерить размах исследуемого сигнала.

В частных случаях, когда форма сигнала во всех участках цепи одинаковая, калибровку можно производить упрощенным способом. Так как при неизменной форме кривой сигнала действующее значение и размах напряжения пропорциональны друг другу, то можно, не делая никаких пересчетов, сразу определить действующее напряжение, соответствующее каждой клетке. Например, показания вольтметра, проградуированного в действующих значениях, составляет 3 В, а изображение на экране занимает 6 кл. Очевидно, что в этом случае цена деления соответствует 2 В. Однако следует помнить, что подобный упрощенный метод допустим только в тех случаях, когда измеряемые напряжения имеют одну и ту же форму.

Способ второй. Входной вывод осциллографа подключают к источнику с известным напряжением. В осциллографах есть гнездо «Калибровочный сигнал». Это гнездо внутри осциллографа соединено с источником, размах напряжения которого точно известен и к которому можно подключить входные выводы вертикального канала осциллографа. Регулятор усиления устанавливают в положение, при котором цена деления клетки удобна для работы. После калибровки изменять положение регулятора усиления вертикального канала нельзя, поскольку при этом изменяется цена деления клетки.

Способ третий. Замечают число клеток, занимаемых измеряемым изображением, а затем вместо измеряемого напряжения под-

ключают калибровочное, значение которого изменяется с помощью плавного делителя напряжения, проградуированного в единицах напряжения. Калибровочное и измеряемое изображения устанавливаются равными по значению и снимают отсчет по лимбу калибровочного регулятора.

Способ четвертый. Данный способ отличается от предыдущего тем, что при калибровке измеряемое напряжение не отключается, а на экране появляется специальный калибровочный импульс, размер которого может изменяться или оставаться постоянным. В обоих случаях значение калибровочного напряжения известно по паспорту, если напряжение неизменно, или по показаниям калибровочного лимба, если напряжение изменяется. Для последнего способа необходимо двухканальное осциллографическое устройство на один канал которого подается измеряемое напряжение, а на второй — калибровочное. Многие современные осциллографы не имеют плавной регулировки усиления по напряжению, в канале Y изменение вертикального размера производят многоступенчатым переключателем скачкообразного типа. Около каждой позиции переключателя нанесена цена деления клетки, получающаяся в данной позиции переключателя. При работе с осциллографами подобной конструкции необходимость в калибровке отпадает. Осциллографом пользуются так же, как и обычными измерительными приборами, например, стрелочного типа. Измерения напряжений с помощью осциллографа по точности в ряде случаев уступают стрелочным и тем более цифровым приборам, но по универсальности — стоят на первом месте. Студенты должны выработать навыки работы с приборами осциллографического типа и производить измерения по возможности с помощью осциллографов.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать $I_1^{(1)}$, $I_2^{(1)}$, $I_3^{(1)}$; $\dot{U}_{R_1}^{(1)}$, $\dot{U}_{R_2}^{(1)}$, $\dot{U}_{R_3}^{(1)}$ по схеме рис. 12.3; $I_1^{(2)}$, $I_2^{(2)}$, $I_3^{(2)}$; $\dot{U}_{R_1}^{(2)}$, $\dot{U}_{R_2}^{(2)}$, $\dot{U}_{R_3}^{(2)}$ по схеме рис. 12.4 и I_1 , I_2 , I_3 ; \dot{U}_{R_1} , \dot{U}_{R_2} , \dot{U}_{R_3} по схеме рис. 12.2. Сравнить найденные значения с данными, полученными в процессе предварительного расчета в работе № 3. Исходные данные те же, что и в работе № 3. Результаты расчетов и последующих экспериментов занести в табл. 12.1.

2. Выполнить те же расчеты, если полярность источника тока изменена на противоположную.

Задание. Откалибровать осциллограф. Измерить с помощью осциллографа падения напряжения на всех элементах цепи. Сравнить результаты измерений, выполненных с помощью осциллографа и стрелочного вольтметра.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Откалибровать вертикальный канал осциллографа. Для этого собрать цепь по схеме рис. 12.5, установить напряжение на выходе генератора равным 3 В и с помощью регулятора усиления вертикального канала получить изображение

размером в 6 кл. При этом цена деления каждой клетки составит 0,5 В/кл.

П р и м е ч а н и е. Если при измерении некоторых напряжений размер изображения оказывается мал, то можно переключить скачкообразный регулятор усиления вертикального канала осциллографа и тем самым увеличить его чувствительность. Например, если при положении переключателя «Ослабление» 1 : 10 цена деления клетки составляет 0,5 В/кл, то при переводе переключателя в положение 1 : 1 размеры изображений станут в 10 раз больше, а цена деления клетки соответственно в такое же число раз меньше (0,05 вместо 0,5 В/кл). Если изображение на экране занимает менее 1 кл, то чувствительность вертикального канала следует повышать. Можно также изменять чувствительность осциллографа не в 10 раз, а в меньшее число раз с помощью плавного регулятора усиления вертикального канала. До начала работы следует заметить положение плавного переключателя, при котором чувствительность меняется в необходимое число раз, например в 2, 5 раз и т. д.

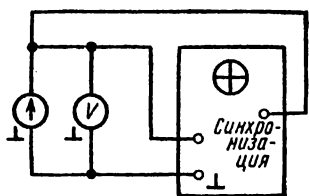


Рис. 12.5

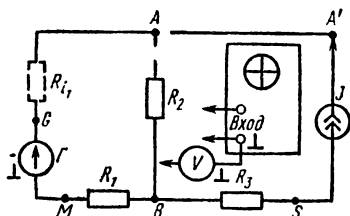


Рис. 12.6

2. Собрать цепь по схеме рис. 12.6. Источник тока к точке A' не подключать. На генераторе установить минимальное выходное сопротивление (например, 5 Ом), частоту — в соответствии с заданием (например, 5 кГц), напряжение — согласно предварительному расчету. Условимся напряжение на резисторах обозначать двумя буквенными индексами, причем первая буква указывает точку, от которой течет ток через резистор, вторая — точку, к которой течет ток. Например, если через резистор R_2 ток протекает от точки A к точке B , то падение напряжения на нем записывается U_{AB} или $-U_{BA}$. Аналогично, при обозначении напряжений источников первый индекс характеризует точку с более высоким потенциалом, а второй — с более низким.

3. Подключить осциллограф параллельно резистору R_2 корпусным выводом к точке B . Заметить вертикаль, на которой оказывается одно из максимальных значений синусоиды. Измерить напряжение U_{AB} . Для этого входным зажимом вольтметра дотронуться до точки A . Сравнить напряжения, получившиеся с помощью осциллографа и вольтмет-

Таблица 12.1

$E = \quad ; J = \quad ; R_{I1} = \quad ; R_1 = \quad ; R_2 = \quad ; R_3 = \quad ;$ Цена деления клетки осциллографа по вертикали																
Измеряемые величины	Прямое включение источника тока								Обратное включение источника тока							
	Получено при эксперименте				Рассчитано по экспериментальным данным				Получено при эксперименте				Рассчитано по экспериментальным данным			
	Показания осциллографа		Показание вольтметра, В		Показания осциллографа		Показание вольтметра, В		Показания осциллографа		Показание вольтметра, В		Показания осциллографа		Показание вольтметра, В	
	По масштабному расч.	Графа, кВ	По масштабному расч.	Графа, кВ	По масштабному расч.	Графа, кВ	По масштабному расч.	Графа, кВ	По масштабному расч.	Графа, кВ	По масштабному расч.	Графа, кВ	По масштабному расч.	Графа, кВ	По масштабному расч.	Графа, кВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
$U_{BM}^{(1)}$, В																
$U_{AB}^{(1)}$, В																
$U_{BS}^{(1)}$, В																
$I_1^{(1)}$, мА																
$I_2^{(1)}$, мА																
$I_3^{(1)}$, мА																

$U_{BM}^{(2)}, B$ $U_{AB}^{(2)}, B$ $U_{BS}^{(2)}, B$ $U_{CA}^{(2)}, B$ $I_1^{(2)}, \text{mA}$ $I_2^{(2)}, \text{mA}$ $I_3^{(2)}, \text{mA}$ U_{BM}, B U_{AB}, B U_{BS}, B U_{CA}, B I_1, mA I_2, mA I_3, mA

ра. Аналогичным образом измерить падения напряжения на резисторе R_1 и между точками A и G .

4. С помощью регулятора «E—var» уменьшить ЭДС E до нуля (внутреннее сопротивление остается неизменным), подключить к точке A источник тока, измерить падения напряжения на зажимах источника тока и на резисторах R_{11} , R_1 , R_2 , R_3 . Обращать внимание на направления токов в ветвях. Каждое измерение производить с помощью осциллографа, а затем для контроля подключать вольтметр и сравнивать показания.

5. Подключить осциллограф и вольтметр параллельно резистору R_1 корпусным выводом к точке M . Ток в резисторе R_1 $I_1 = \frac{E - jR_2}{R_{11} + R_1 + R_2}$ при $E = 0$ протекает в некотором направлении (в данном случае от точки M к точке B), при $E = jR_2$ равен нулю, а при $E > jR_2$ протекает в противоположном (от точки B к точке M) направлении. Очевидно, что при $E = 0$ на выбранной вертикали должен оказаться минимум синусоиды. По мере увеличения ЭДС E амплитуда синусоиды будет сначала уменьшаться до нуля, а затем увеличиваться. В результате на той же вертикали окажется максимум синусоиды. Изменять ЭДС E от нуля до расчетного значения, наблюдать за кривой на экране осциллографа и показаниями вольтметра. Установить расчетное значение E , измерить падения напряжения на всех резисторах и источнике тока.

6. Изменить полярность источника тока и измерить падения напряжения на всех резисторах. При измерении напряжения на резисторе R_2 изменять E от нуля до расчетного значения. Наблюдать за изменениями кривой на экране осциллографа и показаниями вольтметра.

Обработка результатов измерений

Зная цену деления клетки и число клеток, занимаемых изображением, рассчитать напряжения, измеренные осциллографом, для выполнения экспериментов и сравнить полученные результаты с аналогичными, найденными теоретически.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем сущность метода наложения и какие ограничения он имеет?
2. Рассчитайте методом наложения токи в схеме рис. 12.7. Проверьте выполнение первого закона Кирхгофа для каждого узла, второго — для каждого контура и баланса мощностей во всей цепи.
3. Какие способы калибровки осциллографа вы знаете?

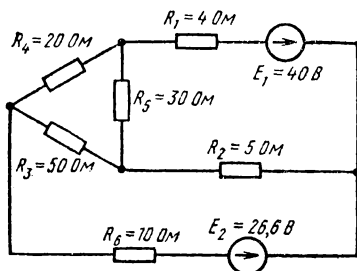


Рис. 12.7

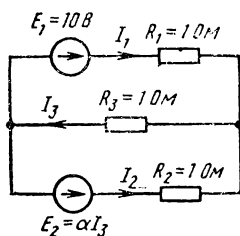


Рис. 12.8

4. Докажите, что в схеме рис. 12.4
$$i_1 = \frac{\dot{E} - j R_2}{R_{11} + R_1 + R_2};$$

$$i_2 = \frac{\dot{E} + j R_1}{R_{11} + R_1 + R_2}.$$

5. Можно ли рассчитывать мощность методом наложения? Если нельзя, то почему?

6. Определите методом наложения токи в схеме рис. 12.8.

Лабораторная работа № 13

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 5.1—5.3; 2) изучить описание данной работы; 3) выполнить предварительный расчет; 4) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментально получить ВАХ резистивных элементов с помощью электронного осциллографа, определить коэффициенты полиномов, аппроксимирующих эти характеристики.

Резистивные элементы делят на линейные и нелинейные. *Линейными* называют элементы, сопротивления которых не зависят от протекающего тока или приложенного напряжения. Сопротивления нелинейных элементов зависят от тока или напряжения. ВАХ линейных элементов описываются полиномом первой степени и представляют собой прямые линии (прямая *a* на рис. 13.1), а ВАХ нелинейных элементов приближенно аппроксимируются полиномами более высоких степеней и представляют собой кривые (кривая *b* на рис. 13.1). В общем случае уравнение для линейных элементов

имеет вид $i = gu$, а для нелинейных — $i = a_1u + a_2u^2 + a_3u^3 + \dots$, где g, a_1, a_2, a_3, \dots — постоянные коэффициенты, зависящие от вида элементов.

Получать экспериментально ВАХ можно различными способами, например по точкам с помощью вольтметра и амперметра. Подобный метод, несмотря на достаточно высокую точность, обладает рядом существенных недостатков: трудоемкость снятия характеристик, невозможность получения фотографических снимков кривых, недостаточная наглядность, особенно при исследованиях в динамическом режиме и т. д. От этих недостатков свободен осциллографический метод получения ВАХ. Принцип таких измерений основывается на следующем. Собирают цепь по схеме рис. 13.2. Сопротивление резистора $R_{ш}$ выбирают много меньше сопротивления исследуемого

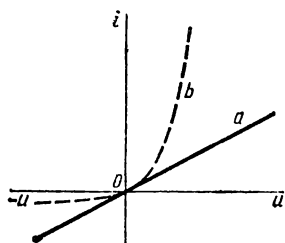


Рис. 13.1

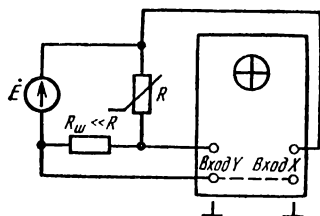


Рис. 13.2

нелинейного элемента в любом режиме. Напряжение на резисторе $R_{ш}$, пропорциональное току, текущему через данный элемент, подводят к вертикальному каналу осциллографа. Очевидно, что размер вертикального отклонения луча пропорционален мгновенному значению тока в цепи. Напряжение на нелинейном элементе (падением напряжения на $R_{ш}$ пренебрегаем из-за его малости) подается на горизонтальный канал, при этом кривая, получившаяся на экране осциллографа, представляет зависимость $i = f(u)$ и, следовательно, является ВАХ исследуемого элемента или цепи. Чтобы знать количественные соотношения, осциллограф предварительно следует откалибровать, т. е. определить цену деления шкалы по горизонтали и вертикали.

Если к входу линейной цепи подвести напряжение гармонической формы, то все отклики (токи в различных ветвях и напряжения между любыми точками цепи) будут иметь также гармоническую форму, если хотя бы один элемент цепи является нелинейным, то все отклики в общем случае становятся отличными от гармонических.

Каждый периодический негармонический сигнал можно заменить суммой нескольких гармонических сигналов с различными вполне определенными частотами, амплитудами и начальными фазами. Таким образом, если к входу нелинейной цепи подвести гармоническое напряжение с некоторой частотой, то на ее выходе окажется напряжение с несколькими частотами, форма выходного сигнала будет отличной от гармонической. Форма сигнала и амплитуды гармоник определяются видом ВАХ цепи. Если ВАХ цепи описывается полиномом $i = a_1u + a_2u^2 + a_3u^3 + \dots$, то амплитуды гармониче-

ских составляющих тока I_{mk} можно найти из следующих выражений:

$$\begin{aligned} \text{на частоте } f_1 \quad I_{m1} &= a_1 U_m + (3/4) a_3 U_m^3 + (5/8) a_5 U_m^5; \\ \text{на частоте } f_2 = 2f_1 \quad I_{m2} &= (1/2) a_2 U_m^2 + (1/2) a_4 U_m^4; \\ \text{на частоте } f_3 = 3f_1 \quad I_{m3} &= (1/4) a_3 U_m^3 + (5/16) a_5 U_m^5; \\ \text{на частоте } f_4 = 4f_1 \quad I_{m4} &= (1/8) a_4 U_m^4; \\ \text{на частоте } f_5 = 5f_1 \quad I_{m5} &= (1/16) a_5 U_m^5, \end{aligned} \quad (13.1)$$

где U_m, f_1 — амплитуда и частота воздействующего напряжения.

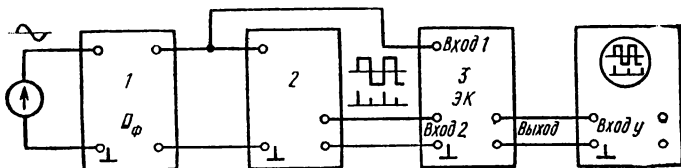


Рис. 13.3

Зная амплитуды токов на различных частотах I_{mk} (или иных откликов), можно рассчитать коэффициенты полиномов, описывающих ВАХ цепи:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{I_{m1} - 3I_{m3} + 5I_{m5}}{U_m}; \quad a_2 = \frac{2(I_{m2} - 4I_{m4})}{U_m^2}; \\ a_3 &= \frac{4(I_{m3} - 5I_{m5})}{U_m^3}; \quad a_4 = \frac{8I_{m4}}{U_m^4}; \quad a_5 = \frac{16I_{m5}}{U_m^5}. \end{aligned} \quad (13.2)$$

Из приведенных выражений следует, что гармоники с частотами, отличающимися от частоты воздействия в 1, 3, 5 ... раз, зависят от членов полинома с нечетными степенями, а гармоники, отличающиеся в 2, 4 ... раз, — от членов с четными степенями. Если уравнения содержат члены только с нечетными степенями, то ВАХ и кривые откликов симметричны, а если члены с четными степенями, то несимметричны относительно горизонтальной оси.

Для экспериментального определения коэффициентов полиномов, описывающих ВАХ, собирается устройство (рис. 13.3), работающее следующим образом. Напряжение гармонической формы подводят к преобразователю 1, представляющему нелинейный элемент, ВАХ которого следует определить. На выходе преобразователя получают напряжение несинусоидальной формы, например П-образной. Это напряжение подают на вход первого канала электронного коммутатора 3 и на вход анализатора гармонического состава сигнала 2. На выходе этого блока получают сигналы, которые на экране осциллографа прочерчивают вертикальные линии на частотах, имеющихся в составе сигнала. Длина линий пропорциональна амплитудным значениям гармонических составляющих. Например, сигнал П-образной формы состоит из нечетных гармоник, амплитуды которых уменьшаются пропорционально номеру гармоники. Если подвести такой сигнал к входу 2 (см. рис. 13.3), то на выходе будет напряжение, дающее на экране осциллографа изображение, состоя-

щее из нескольких спектральных линий (рис. 13.4). Чтобы на экране однолучевого осциллографа можно было бы наблюдать два изображения (временное, в данном случае в виде сигнала П-образной формы и спектральное в виде совокупности импульсов на частотах гармоник), необходимо оба этих сигнала подвести к осциллографу через электронный коммутатор 3 (см. рис. 13.3). Коммутатор в некоторый момент времени запирает первый канал и открывает второй, затем, наоборот, открывает первый и запирает второй канал. В действительности изображения высвечиваются на экране поочередно, но так как переключение происходит с большой частотой, то оба изображения кажутся наблюдателю светящимися одновременно.

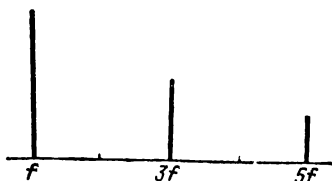


Рис. 13.4

Чтобы рассчитать коэффициент полинома, описывающего ВАХ нелинейного элемента, который превращает синусоидальный сигнал в несинусоидальный, следует найти частоты спектральных составляющих получившегося несинусоидального сигнала. Если спектр выходного сигнала соответствует рис. 13.4 (состоит из первой, третьей и пятой гармоник), то в полиноме, описывающем ВАХ цепи, имеются члены первой, третьей и пятой степеней. Если их длины относятся как 10 : 3,3 : 2, то, как следует из выражений (13.1), в преобразователе использовался нелинейный элемент с характеристикой $i = 1u - \frac{8}{3}u^3 + \frac{16}{5}u^5$ и т. д.

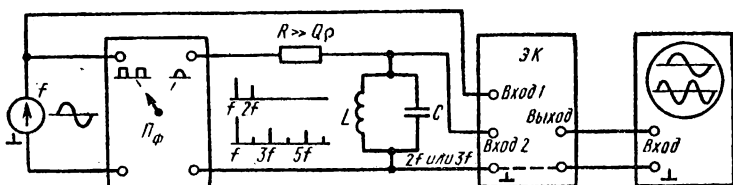


Рис. 13.5

Элементы с нелинейными ВАХ используют в устройствах, позволяющих преобразовать формы сигналов и осуществлять, например, выпрямление переменного тока, ограничение сигналов, стабилизацию напряжения (тока), преобразование частоты, модуляцию сигналов, детектирование и т. д., что в принципе невозможно в линейных цепях. Рассмотрим один из способов умножения частоты с помощью цепи, содержащей нелинейные элементы.

Чтобы получить четырехполюсник, на выходе которого напряжение имеет синусоидальную форму с частотой в k раз большей, чем на входе, где k — целое положительное число, собирают устройство, показанное на рис. 13.5. Гармоническое напряжение с частотой f подводят к входу преобразователя, ВАХ которого описывается полиномом не ниже k степени. Желательно, чтобы ВАХ имела такой вид, при котором коэффициент при члене со степенью k имеет возможно большее значение. После преобразователя формы сигнала включают контур, настроенный на частоту kf . Для всех

частот, кроме kf , контур представляет собой малое сопротивление, а для частоты kf — большое. При этом на выходе контура выделяется напряжение только с частотой kf , которая в k раз больше частоты входного сигнала. Например, для удвоения частоты используют преобразователь в виде обычного диода. Так как ВАХ такого элемента описывается уравнением $i = 0,5u + 0,08u^2 + 0,32u^4$, то амплитуда тока второй гармоники достигает 40 % от амплитуды тока первой гармоники (кривая a на рис. 13.6). Для утроения частоты применяют элементы, ВАХ которых симметричны относительно горизонтальной оси и имеют резкие изломы (кривая b на рис. 13.6).

Рассмотрим случай, когда на вход четырехполюсника подводят напряжения с двумя различными частотами f_1 и f_2 . Если ВАХ цепи линейна, то на выходе будут колебания только этих частот, а если нелинейна, то отклики содержат в общем случае колебания не только основных, но и комбинационных (т. е. суммарных и разностных) частот. Например, напряжения с частотами f_1 и f_2 приложены к нелинейному элементу, ВАХ которого описывается полиномом $i = a_1u + a_2u^2$. В откликах при этом оказываются напряжения с частотами $f_1, f_2, 2f_1, 2f_2, f_1 \pm f_2$. Например, $f_1 = 1$ кГц; $f_2 = 3$ кГц.

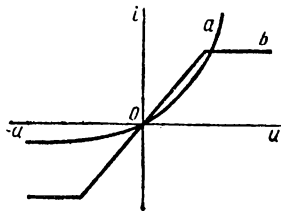


Рис. 13.6

На выходе нелинейного четырехполюсника с квадратичной характеристикой будут напряжения с частотами 1, 2, 3, 4, 6 кГц. При ВАХ цепи вида $i = a_1u + a_2u^2 + a_3u^3$ число комбинационных частот достигает двенадцати ($f_1, f_2, 2f_1, 2f_2, f_1 \pm f_2, 3f_1, 3f_2, 2f_1 \pm f_2, 2f_2 \pm f_1$); при сигналах с несколькими частотами на входе и нелинейной характеристикой более высокого порядка число получающихся частот значительно возрастает. Следует иметь в виду, что если частоты f_1 и f_2 мало отличаются друг от друга, то разностная частота $f_1 - f_2$ ($f_2 - f_1$) оказывается значительно меньше частот f_1 и f_2 . Приемом понижения частоты широко пользуются на практике, например в радиоприемных устройствах, измерительной аппаратуре и т. д.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать и занести в табл. 13.1 значения частот колебаний на выходе преобразователя, если на вход подается гармонический сигнал $f = 2$ кГц, а ВАХ цепи описываются полиномами: а) $i = a_1u + a_2u^2 + a_4u^4$; б) $i = a_1u + a_3u^3 + a_5u^5$.

2. Определить частоты на выходе нелинейного четырехполюсника, если ВАХ цепи описывается полиномом второй степени $i = a_1u + a_2u^2$, а к входу приложено два гармонических сигнала с частотами $f_1 = 2$ кГц; $f_2 = 4$ кГц.

Задание. Познакомиться с устройством, позволяющим наблюдать на экране осциллографа временные и спектральные изображения одновременно. Экспериментально определить ВАХ исследуемых нелинейных элементов. Прodelать

Частота воздействия, кГц	По предварительному расчету	
	ВАХ цепи	частоты в откликах, кГц
2	$i = u + u^2 + 8u^4$	
2	$i = a - \frac{8}{3}u^3 + \frac{16}{3}u^5$	
1 и 2	$i = 0,5u + 0,04u^2$	

эксперименты по умножению частоты. Исследовать гармонический состав напряжения на выходе нелинейной цепи при бигармоническом воздействии на ее входе.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Произвести калибровку осциллографа. Для этого собрать цепь по схеме рис. 13.2. В качестве исследуемого элемента подключить магазин сопротивлений R_V с линейными резисторами. Установить частоту генератора и напряжение согласно варианту задания (например, $f = 2$ кГц; $U = 2,82$ В), измерительное сопротивление 10 Ом. Установить $R_{V1} = 200$ Ом. Изменяя положение регуляторов усиления горизонтального и вертикального каналов осциллографа, добиться, чтобы на экране была прямая наклонная линия, размещающаяся в пределах экрана. Рассчитать ток

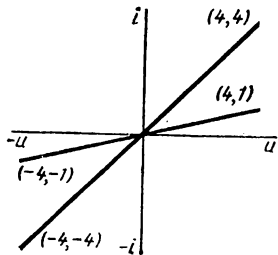


Рис. 13.7

в исследуемой цепи. Например, если $U_m = U\sqrt{2} = 4$ В, $R_U = 200$ Ом, $R_{ш} = 10$ Ом, то $I_m = 20$ мА. Выбрать цену деления клетки. В данном случае удобно принять по вертикали 5 мА/кл, а по горизонтали — 1 В/кл. Регуляторы вертикального и горизонтального каналов установить в такие положения, при которых конечная точка прямой ВАХ смещена на 4 кл как по вертикали, так и по горизонтали от своего центра (рис. 13.7). Увеличить сопротивление резистора R_V . При этом ток уменьшается и ВАХ будет более полой. Для проверки правильности калибровки сопро-

тивление резистора следует увеличивать, например в четыре раза. Напряжение при этом останется практически неизменным, а ток уменьшится в такое же число раз. Следовательно, конечные точки ВАХ должны иметь координаты (4, 1) и (—4, —1). Зарисовать полученные изображения. После калибровки положения регуляторов усиления изменять не следует, чтобы цена деления клеток оставалась неизменной.

2. Вместо R_V включить нелинейный элемент $HЭ_1$. Изменяя напряжения генератора, получить ВАХ, размещенную на экране наилучшим образом. Зарисовать получившуюся ВАХ.

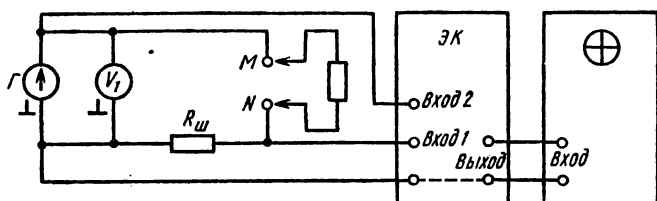
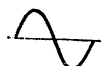


Рис. 13.8

3. Регулятором $ПНЭ_1$ изменить вид ВАХ. Зарисовать получившееся изображение.

4. Вместо элемента $HЭ_1$ подключить элемент $HЭ_2$. Зарисовать ВАХ.

5. Собрать цепь по схеме рис. 13.8. К точкам MN подключить магазин сопротивлений $R_V = 200$ Ом. Переключатель форм сигналов на генераторе $П_ф$ установить в позицию

, выходное напряжение 1 В. Так как осциллограф

включен через электронный коммутатор, то на экране будет два изображения, соответствующие на первом каналу тока, а на втором напряжению в исследуемой цепи.

Регуляторы коммутатора установить в такие положения, при которых изображение на экране имеют наилучшие размеры для наблюдения. Поскольку цепь состоит из линейных элементов, форма тока и напряжение будут синусоидальными. Увеличивать сопротивление R_V . Убедиться, что амплитуда тока при этом уменьшается, но ее форма остается неизменной.

6. Вместо резистора R_V подключить нелинейный элемент $HЭ_1$. На вольтметре V_1 установить 3 В. Убедиться, что ток в цепи с нелинейным элементом оказывается несинусоидальным при гармоническом входном напряжении. Зарисовать кривые напряжения и тока при трех положениях переключателя.

7. Вместо элемента $HЭ_1$ подключить нелинейный элемент $HЭ_2$. Зарисовать несколько кривых напряжения и тока при различных значениях входного напряжения.

8. Собрать цепь по схеме рис. 13.3. Переключатель формы сигналов на генераторе установить в положение



· Произвести калибровку анализатора гармонического состава сигналов, т. е. определить частоты, на кото-

рых в нижней части экрана осциллографа образуются вертикальные светящиеся линии длиной, пропорциональной максимальному значению напряжения на данной частоте. Установить на генераторе $U_1 = 5$ В; $f = 2,5$ кГц. При этом на верхней (временной) части экрана будет видна синусоида, на нижней (спектральной) — горизонтальная линия, поскольку частота 2,5 кГц находится за пределами полосы пропускания анализатора.

Медленно уменьшать частоту генератора. При частотах, близких к $f_1 = 2$ кГц, на экране должна появиться спектральная линия. Зарисовать получившееся изображение. Записать частоту f_1 , при которой спектральная линия имеет наибольшую амплитуду. Изменяя выходное напряжение генератора, убедиться, что при этом изменяется амплитуда гармонического сигнала и длина спектральной линии. Снова установить на генераторе $U_1 = 5$ В. При частоте, близкой к 4 кГц, найти f_2 , близкой к 6 кГц — f_3 , близкой к 8 кГц — f_4 , близкой к 10 кГц — f_5 . Записать частоты, при которых спектральные линии имеют наибольшую длину. Зарисовать получающиеся изображения. Установить частоту $f_1 = 2$ кГц.

9. Переключатель P_Φ перевести в позицию




При этом между генератором синусоидальных сигналов и входом электронного коммутатора окажется включенным четырехполюсник с нелинейным элементом, что изменит гармонический состав сигнала. Зарисовать в масштабе наб-


людаемые изображения, определить частоты и относительные длины спектральных линий.

10. Подключать по очереди нелинейные элементы, заданные в соответствии с выполняемым вариантом (для этого переключатель P_{Φ} следует установить в соответствующие положения). Зарисовать спектры токов, получающихся при гармоническом воздействии.

11. Собрать цепь по схеме рис. 13.5 для умножения частоты. Переключатель P_{Φ} установить в позицию, при которой к выходным зажимам подводится сигнал с четко выраженной второй гармоникой. На верхней части экрана появится сигнал частотой f , подаваемой с генератора, а на нижней — сигнал, получающийся после преобразователя. Изменяя параметры избирательной цепи, найти частоту, при которой на выходе контура, а следовательно, и на нижней части экрана осциллографа окажется синусоида с удвоенной частотой и возможно большей амплитудой. Переключатель

P_{Φ} перевести в положение.  Так как при этом

цепь состоит из линейных элементов, то сигнал на выходе генератора будет синусоидальным, состоящим из одной (первой) гармоники. Поскольку второй гармоники в синусоидальном сигнале нет, получить удвоение частоты в этом случае не представляется возможным. Убедиться, что ни при каком положении регуляторов нельзя на втором канале получить частоту, отличную от частоты генератора. Пе-

реключатель P_{Φ} перевести в положение  При

этом ВАХ цепи становится нелинейной, симметричной относительно горизонтальной оси и, следовательно, состоящей из членов с нечетными степенями. Изменить положение регулятора резонансной частоты контура. Убедиться, что на выходе контура можно получить утроение и упятерение (но не удвоение и не учетверение) частоты.

12. Исследовать гармонический состав сигнала, получающегося на выходе нелинейного элемента с двумя частотами на входе. Для этого последовательно с генератором, имеющим частоту f , включить генератор с частотой $2f$.

При работе с аппаратурой иметь в виду, что напряжение с частотой $2f$ устанавливается автоматически в зависи-

мости от положения регулятора частоты генератора. Уровень выходного напряжения генератора частотой $2f$ изменяется регулятором «Амплитуда $2f$ ». На генераторе установить частоту 2 кГц, при этом на выходных зажимах генератора с частотой $2f$ окажется напряжение частотой 4 кГц. Поскольку нелинейный элемент, используемый в данном эксперименте, имеет ВАХ, близкую к квадратичной, то на выходе контура получатся гармонические сигналы с различными комбинационными частотами. Изменяя резонансную частоту контура, определить гармонический состав выходного сигнала.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать цену делений клеток на экране осциллографа по горизонтали (В/кл) и вертикали (мА/кл). Нанести получившиеся числовые значения на координатные оси зарисованных ВАХ.

2. Сравнить форму ВАХ с формой выходного напряжения при гармоническом воздействии.

3. Найти коэффициенты полиномов, описывающих характеристики нелинейных элементов, используемых в проведенных экспериментах.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем отличаются ВАХ линейных и нелинейных резистивных элементов? Приведите примеры нелинейных резистивных элементов.

2. Как аналитически описываются ВАХ линейных и нелинейных резистивных элементов?

3. Начертите схему, которая позволяет получить ВАХ цепи с помощью осциллографа. Объясните принцип работы данного устройства.

4. Каким образом производят калибровку осциллографа? Предложите способы определения цены деления клетки, кроме рассмотренных в работе.

5. Постройте ВАХ цепи, если $i = 10i - 5i^2 + 2i^3$.

6. Синусоидальное напряжение амплитудой $U_m = 10$ В приложено к цепи, ВАХ которой $i = 5\sqrt{i}$. Рассчитайте и постройте кривую мгновенного значения тока.

7. Постройте кривую мгновенного значения тока, если напряжение имеет синусоидальную форму с $U_m = 10$ В, а ВАХ цепи описывается уравнением $i = 0,05i + 0,1i^2$.

8. Известны ли вам элементы, ВАХ которых имеют S- и N-образные формы. Если известны, то каковы особенности этих элементов, приведите примеры.

9. Составьте структурную схему устройства для определения коэффициента полинома, описывающего ВАХ цепи.

10. Рассчитайте ВАХ цепи, при которой напряжение $U_m = 1, 2, 5, 10$ В с частотой f_1 создает на частотах $f_1, 2f_1, 3f_1, 4f_1, 5f_1$ токи 1 и 10 мА.

11. При какой ВАХ амплитуды гармонических составляющих тока уменьшаются пропорционально номеру гармоники?

12. Определите амплитуды токов на частотах от f_1 до $5f_1$, если ВАХ цепи описывается уравнением $i = 1u + 1u^2 + 1u^3 + 1u^4 + 1u^5$, а U_m равно: а) 1 В; б) 5 В; в) 10 В.

13. На каком принципе основаны устройства, позволяющие выполнять умножение частоты? Можно ли получить: а) удвоение; б) утроение частоты с помощью цепи, ВАХ которой: а) симметрична; б) несимметрична относительно горизонтальной оси. Можно ли получить преобразование частоты с помощью линейных элементов?

14. К цепи с характеристикой $i = a_1u + a_2u^2 + a_3u^3$ приложено напряжение гармонической формы частотой f_1 . Как изменится спектр частот на выходе цепи, если последовательно с генератором подключить генератор частотой $2f_1$?

15. На вход нелинейной цепи с квадратичной характеристикой подключено два источника с гармоническими напряжениями, причем $f_1 = 500$ кГц, $f_2 = 450 \div 500$ кГц. Определите диапазон изменений разностной частоты.

16. Подсчитайте комбинационные частоты, если $f_1 = 1$ кГц, $f_2 = 2$ кГц; $i = u + u^2 + u^3$. Вычислите те же частоты для $i = 2u + 5u^2 + 4u^3$.

Лабораторная работа № 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ТОКОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЯХ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ *

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 5.4; 2) изучить описание данной работы; 3) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментально исследовать форму тока в нелинейной резистивной цепи в зависимости от вида ее ВАХ.

Если к линейной цепи приложено гармоническое напряжение, то все отклики оказываются также гармоническими. Если ВАХ хотя бы одного элемента цепи отлична от линейной, то отклики в общем случае имеют несинусоидальную форму. Форма откликов определяется видом ВАХ элементов цепи. Если ВАХ нелинейна, но симметрична относительно горизонтальной оси, то кривая тока

* Последнюю часть работы рекомендуют в качестве учебно-исследовательской.

во входной цепи нелинейного двухполюсника несинусоидальна, но симметрична относительно этой оси. Если ВАХ нелинейна и не симметрична, то кривая тока несинусоидальна и несимметрична относительно горизонтальной оси. ВАХ некоторых элементов имеет такой вид, при котором для напряжений с малыми амплитудами цепь работает в линейном, а для напряжений с большими амплитудами —

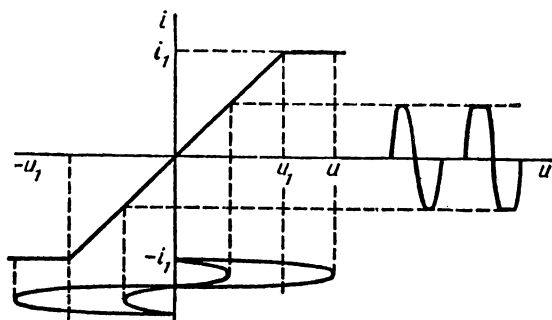


Рис. 14.1

нелинейном режиме (рис. 14.1). Если амплитудное значение входного напряжения не превышает u_1 , то цепь работает в линейном режиме и форма входного тока повторяет форму входного напряжения.

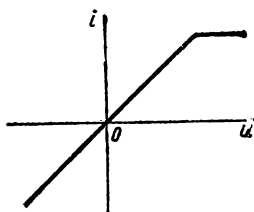


Рис. 14.2

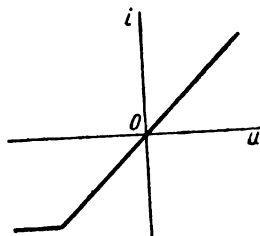


Рис. 14.3

При увеличении напряжения происходит ограничение тока, поскольку, как видно из рис. 14.1, ток в цепи ни при каком значении входного напряжения не может превышать тока ограничения i_1 . Нелинейные элементы, имеющие ВАХ вида рис. 14.1, называют *двусторонними*, а имеющие ВАХ вида рис. 14.2 и 14.3 — *односторонними ограничителями*. Ограничители выполняют в виде полупроводниковых элементов. С помощью ограничителей напряжения гармонической формы можно преобразовывать в напряжения трапецеидальной или близкой к прямоугольной форме, причем чем

меньше отношение $\frac{U_{m\Pi}}{U_{m\Delta}}$, тем при прочих равных ус-

ловиях форма входного напряжения ближе к прямоугольной (рис. 14.4).

Ограничители используют также для стабилизации постоянного напряжения при изменениях напряжения источника в определенных пределах, например за счет колебаний напряжений сети пита-

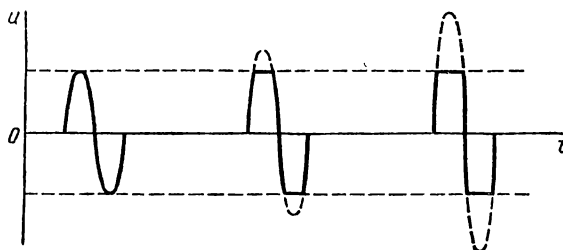


Рис. 14.4

ния. Схема стабилизатора показана на рис. 14.5. Значение стабилизированного выходного напряжения определяется напряжением ограничения нелинейного элемента (стабилитрона). Входное нестабилизированное напряжение при нормальном режиме должно быть больше выходного (стабилизированного). На резисторе $R_{доб}$ па-

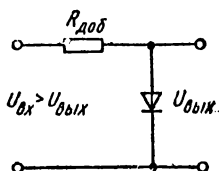


Рис. 14.5

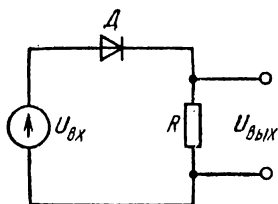


Рис. 14.6

дение напряжения $\Delta U = U_{вх} - U_{вых}$, причем чем больше значение ΔU , тем больше коэффициент стабилизации $K_{ст} = \Delta U_{вх} / \Delta U_{вых}$, но тем больше мощность, выделяющаяся в резисторе $R_{доб}$, и меньше КПД стабилизатора.

На практике входное напряжение $U_{вх}$ выбирают на 30—50 % больше выходного. С помощью элементов вентильного типа (например, полупроводниковых диодов) можно выпрямлять переменный ток (рис. 14.6). Диод характеризуется прямым сопротивлением $R_{пр}$, обратным сопротивлением $R_{обр}$ и проходной емкостью $C_{пр}$. Для идеального вентиля $R_{пр} = 0$, $R_{обр} = \infty$, $C_{пр} = 0$, для реального — $R_{пр} > 0$, $R_{обр} < \infty$, $C_{пр} > 0$, причем при малых напряжениях прямое сопротивление резко возрастает, а коэффициент выпрямления $K_{выпр} = R_{обр} / R_{пр}$ уменьшается. Плоскостные диоды способ-

ны выпрямлять достаточно большие токи (доли — единицы ампер), но из-за больших проходных емкостей применяются только на низких частотах (десятки—сотни герц). Точечные диоды пропускают небольшие токи (единицы—десятки миллиампер), но их частотный диапазон значительно шире (до десятков мегагерц). При работе в диапазоне сверхвысоких частот используют диоды специальных типов. В настоящее время получили широкое распространение не-

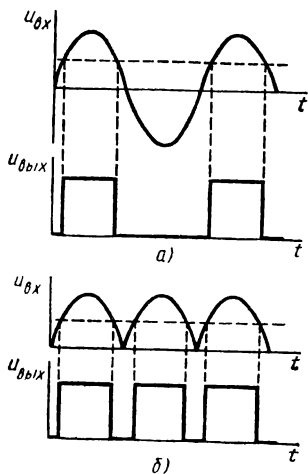


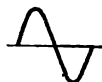
Рис. 14.7

линейные резистивные элементы с управляемой ВАХ. Принцип действия таких элементов основывается на том, что если управляющее напряжение меньше некоторого значения, определенного для данного типа элемента, то сопротивление этого элемента достаточно велико и ток источника питания, протекающий через элемент, оказывается малым. Как только управляющее напряжение достигает определенного значения, сопротивление элемента уменьшается скачком. При этом ток в цепи также скачком возрастает и остается неизменным до тех пор, пока управляющее напряжение снова не уменьшится до напряжения срабатывания. Таким образом, ток в выходной цепи может принимать только два значения — малое и большое, т. е. меняться по закону сигналов прямоугольной формы. Ток, протекающий через нагрузку R_n , создает на ней падение напряжения

Задание. Экспериментально исследовать форму тока в резистивных нелинейных цепях при гармоническом воздействии.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 14.8. Частоту и выходное напряжение генератора установить в соответствии с вариантом задания (например, $f = 500$ Гц; $U_{\text{вых}} = 5$ В), переключатель P_{Φ} генератора в положение



В качестве нелинейного элемента $HЭ$ использовать двухполосник $HЭ_3$. Тумблер «Режим» на электронном коммутаторе перевести в позицию «ВАХ», а регуляторы усиления — в положение, при котором ВАХ цепи укладывается в преде-

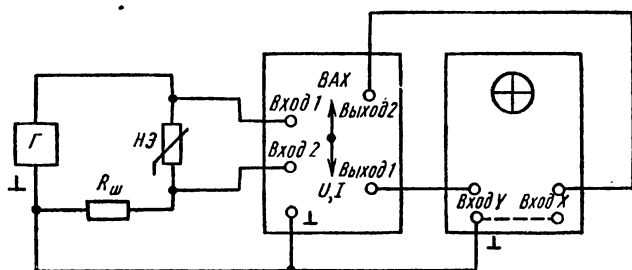


Рис. 14.8

лах экрана. Переключатель параметров на нелинейном двухполоснике ($ПНЭ_3$) поочередно устанавливать в различные позиции, зарисовывать получающиеся при этом ВАХ цепи. Переключатель $ПНЭ_3$ вернуть в исходное положение.

2. Зная форму ВАХ цепи, нарисовать примерную форму тока в режимах малых и больших сигналов при подключении к цепи источника гармонического напряжения.

3. Тумблер «Режим» на электронном коммутаторе перевести в положение « $U - I$ ». При этом изображение на первом канале будет соответствовать напряжению на входе, а на втором — напряжению на выходе цепи. С помощью регуляторов усиления на электронном коммутаторе установить наилучшие размеры изображения. Поскольку выходное напряжение в исследуемой цепи снимается с резистивного элемента, форма этого напряжения повторяет форму тока в цепи. Устанавливать переключатель $ПНЭ_3$ в различные положения. Зарисовать кривые напряжения и тока для случаев,

когда: а) ограничение отсутствует; б) ограничение происходит. Сравнить кривые, полученные экспериментально, с аналогичными кривыми, построенными согласно п. 2.

4. Переключатель $ПНЭ_3$ установить в позицию двустороннего ограничения. Изменять выходное напряжение от нулевого до максимального. Зарисовать форму выходного напряжения. Убедиться, что с увеличением напряжения на входе выходное напряжение все более приближается к прямоугольному.

5. С помощью переключателя $П_\Phi$ изменять форму входного сигнала. Изменяя амплитуду входного, наблюдать за формой выходного напряжения.

6. Переключатель $П_\Phi$ перевести в положение  .

Вместо нелинейного двухполюсника $НЭ_3$ подключить двухполюсник $НЭ_4$. Переключатель $ПНЭ_4$ установить в положение «Плоскостный диод», поддерживать $U_{вх} = 4$ В. Изменять частоту от 0,5 до 20 кГц. Зарисовать кривые формы тока при различных частотах.

П р и м е ч а н и е. При выполнении данного эксперимента регулятор «Развертка» на осциллографе установить в такие позиции, при которых на экране укладывается 2—3 периода напряжения и тока.

7. Переключатель $ПНЭ_4$ перевести в положение «Точечный диод». Прodelать эксперименты, аналогичные выполненным в п. 6.

8. Собрать цепь по схеме рис. 14.9. При этом иметь в виду, что цепи питания уже собраны (внутри стенда), и подключать источники постоянного тока, необходимые для нормальной работы микросхемы, студентам не требуется. На генераторе установить частоту 500 Гц, выходное напряжение 3 В. На первом канале осциллографа должно быть изображение сигнала синусоидальной формы, подаваемого на вход компаратора, а на втором — прямоугольной, снимаемого с выхода компаратора. Изменять частоту генератора. Убедиться, что период прямоугольных сигналов изменяется в зависимости от частоты входного сигнала. Зарисовать с экрана осциллографа получающиеся кривые. Установить частоту 5 кГц. Изменять выходное напряжение. Убедиться, что при управляющем напряжении, меньшем напряжения срабатывания компаратора, изменения внутреннего сопротивления компаратора и преобразования формы напряжения не происходит. Экспериментально определить напряжение срабатывания компаратора.

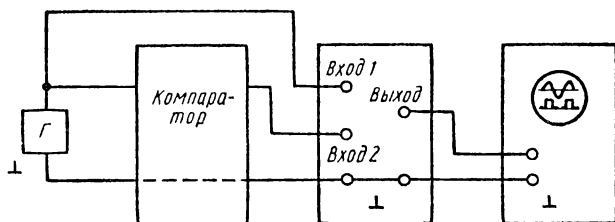


Рис. 14.9

Обработка результатов измерений

1. Сравнить формы тока в цепи при различных ВАХ. Сделать вывод о зависимости формы тока от вида ВАХ цепи.
2. Сравнить получающиеся формы тока при изменении частоты в зависимости от проходной емкости вентиля.
3. Сравнить качество сигналов прямоугольной формы, полученных путем ограничения синусоидального напряжения, и сигналов, определенных с помощью компаратора.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В каких резистивных цепях форма откликов повторяет форму воздействия, а в каких нет?
2. Какие виды симметрии ВАХ вы знаете?
3. Объясните принцип действия односторонних и двусторонних ограничителей.
4. Каким образом напряжение гармонической формы можно преобразовать в напряжение трапециевидальной формы?
5. Составьте схему стабилизатора напряжения. Объясните назначение каждого ее элемента.
6. Начертите схему выпрямления переменного тока. Какие явления происходят в ней при увеличении частоты?
7. Нарисуйте примерную форму выходного напряжения схемы рис. 14.8, если сопротивление: а) увеличивается пропорционально напряжению; б) уменьшается; в) остается неизменным.
8. В чем состоит принцип работы компаратора? Что понимают под напряжением срабатывания? Начертите схему цепи получения периодических сигналов прямоугольной формы с помощью компаратора.
9. Каким образом можно изменять период сформированных сигналов прямоугольной формы?

Лабораторная работа № 15

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочесть по учебнику [1] § 6.2; 2) изучить описание данной работы; 3) выполнить предварительный расчет; 4) заготовить 6 калек по диаметру экрана осциллографа; 6) ответить на вопросы для самопроверки.

Цель работы: *изучить переходные процессы в цепях первого порядка при подключении цепи к источнику постоянного напряжения.*

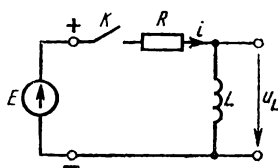


Рис. 15.1

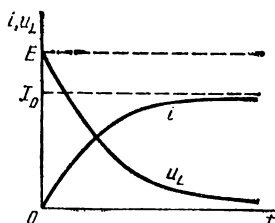


Рис. 15.2

Если резистивно-индуктивную цепь без начального запаса энергии подключить к источнику постоянного напряжения (рис. 15.1), то ток i будет нарастать не скачкообразно, а по закону $i = I_0 (1 - e^{-(R/L)t})$ при $t \geq 0$, где i — мгновенное значение тока в цепи в момент времени t ; I_0 — установившееся значение тока после коммутации. Напряжение на индуктивной катушке изменяется скачкообразно (рис. 15.2):

$$u_L = \begin{cases} E e^{-(R/L)t} & \text{при } t \geq 0; \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

При подключении резистивно-емкостной цепи без начального запаса энергии к источнику постоянного напряжения с ЭДС E (рис. 15.3) напряжение на конденсаторе u_C изменяется по экспоненциальному закону, ток i нарастает скачкообразно, а убывает по экспоненте (рис. 15.4):

$$u_C = E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right); \quad i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{при } t \geq 0.$$

Постоянной времени цепи τ называют время, в течение которого свободная составляющая тока или свободная составляющая напряжения уменьшается в e раз. В неразветвленных RL -цепях $\tau = L/R$, а в RC -цепях $\tau = RC$. При включении цепи к источнику постоян-

ного напряжения ток i (в RL -цепи) или напряжение u_C (в RC -цепи) за время τ достигает 0,63 от установившегося значения. Теоретически вынужденное значение тока i (в RL -цепи) или напряжения u_C (в RC -цепи) устанавливается через бесконечно большое время. Существуют различные критерии практического окончания пере-

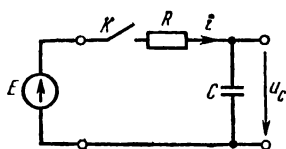


Рис. 15.3

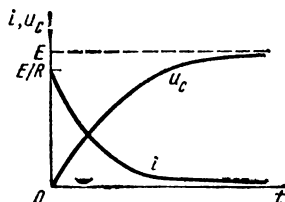


Рис. 15.4

ходного процесса. За время $t = 3\tau$ напряжение на конденсаторе (ток в индуктивной катушке) достигает 0,95 от установившегося значения, а через время $t = 5\tau$ — более 0,99. Аналогичные процессы происходят и при скачкообразном отключении напряжения питания.

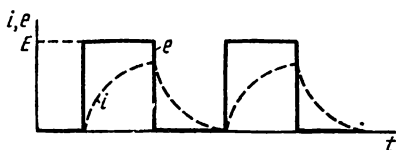
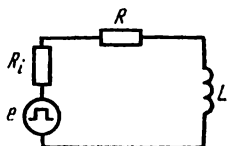


Рис. 15.5

Таким образом, если к RL - или RC -цепи подключить генератор, ЭДС которого имеет прямоугольную форму, то это будет равносильно тому, что постоянное напряжение периодически отключается и подключается к цепи $(R_{вн} + R) L$ или $(R_{вн} + R) C$, где

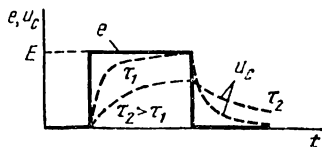
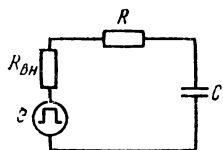


Рис. 15.6

$R_{вн}$ — внутреннее сопротивление генератора сигналов П-образной формы (рис. 15.5). Чем меньше R в RL -цепи, тем больше τ и тем медленнее нарастает и спадает ток. Чем больше R в RC -цепи, тем больше τ и тем медленнее нарастает и спадает напряжение на конденсаторе (рис. 15.6).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать τ для схемы рис. 15.7, если $L = L_1$; $R_{ш} = 10$ и 100 Ом.
2. Найти τ для схемы рис. 15.8, если $C = C_1$; $R_{ш} = 1, 5, 30$ кОм.

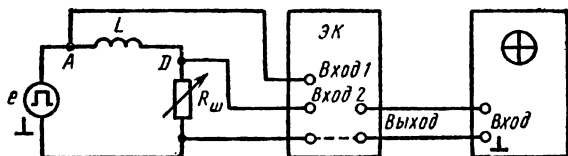


Рис. 15.7

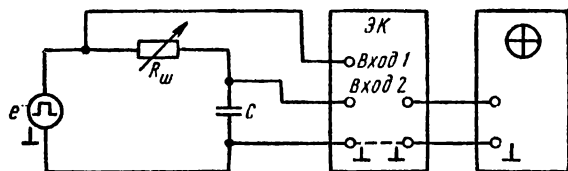


Рис. 15.8

Задание. Экспериментально установить законы изменения напряжений и токов в цепях первого порядка при скачкообразном изменении входного напряжения.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 15.7. Переключатели на генераторе сигналов установить в такие позиции, при которых на выходе генератора будет сигнал П-образной формы. Установить такую частоту, при которой $f = 1/(3\tau_{\max}) = R_{\min}/(3L)$, где R_{\min} — минимальное значение сопротивления цепи в данной серии экспериментов. Так как входной зажим первого канала электронного коммутатора ЭК подключают к точке А, то верхняя кривая на экране осциллографа представляет собой сигнал П-образной формы, снимаемый с генератора и подводимый к входу исследуемой цепи.

Регулятором «Усиление первого канала» установить размер изображения, удобный для наблюдения. Так как при сигналах П-образной формы напряжение скачкообразно изменяется от нуля до максимума (в нашем случае до E), а затем через время, равное периоду сигнала, от максимума до нуля, то генератор прямоугольной формы является

электронным ключом. У электронного ключа имеется большое преимущество по сравнению с устройствами, отключающими источник от цепи (см. рис. 15.1 и 15.3).

При подключении цепи к источнику обычный и электронный ключи действуют одинаково, при отключении же обычным ключом цепь размыкается, что резко увеличивает сопротивление цепи, а при отключении электронным ключом изменяется только воздействующая ЭДС, сопротивление цепи остается неизменным. Поэтому при исследовании цепей в режимах скачкообразных воздействий следует применять электронный ключ. Второй вход коммутатора ЭК подключают к точке D . При этом на нижней части экрана осциллографа появляется кривая, соответствующая падению напряжения на резисторе $R_{ш}$, а следовательно, и току в цепи.

С помощью регулятора «Усиление второго канала» установить размер изображения, удобный для наблюдения. В случае необходимости изменить усиление в горизонтальном канале осциллографа. Регулятором «Смещение осей» сдвинуть изображение так, чтобы кривые наложился друг на друга. Проверить совпадение экспериментальных кривых с аналогичными кривыми, полученными теоретически. Регулятором «Совмещение осей» сдвинуть изображения так, чтобы кривые сместились друг относительно друга, наложить кальку на экран и зарисовать получившиеся изображения.

2. Вместо резистора $R_{ш1} = 10 \text{ Ом}$ включить резистор $R_{ш2} = 100 \text{ Ом}$. Регулятором «Усиление второго канала» установить размер изображения, удобный для наблюдения. Прodelать операции, аналогичные выполненным в п. 1. Зарисовать получившиеся на экране изображения.

3. Катушку L и резистор $R_{ш}$ поменять местами. При этом один вывод катушки оказывается соединенным с корпусной точкой. Зарисовать кривую напряжения на катушке при $R_{ш1} = 10 \text{ Ом}$; $R_{ш2} = 100 \text{ Ом}$.

4. Собрать цепь по схеме рис. 15.8. Зарисовать кривые напряжения на конденсаторе и тока в цепи. Эксперименты производить при $R_{ш} = 1, 5, 30 \text{ кОм}$.

Обработка результатов измерений

1. На горизонтальной оси кривых, зарисованных с экрана осциллографа, указать цену деления в единицах времени.

2. Сравнить постоянные времени τ , полученные экспериментально с аналогичными значениями, найденными теоретически. Напомним, что за время τ ток i (в RL -цепи) или на-

пряжение u_C (в RC -цепи) нарастает до 0,63 от вынужденного значения. Сравнить время τ с длительностью сигнала П-образной формы.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Почему ток в катушке и напряжение на конденсаторе не могут изменяться скачком, а напряжение на катушке и ток через конденсатор могут? Сформулируйте первый и второй законы коммутации.

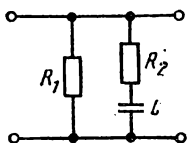


Рис. 15.9

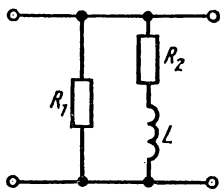


Рис. 15.10

2. Каков физический смысл вынужденной и свободной составляющих токов и напряжений?

3. Рассчитать постоянные времени τ для схем, показанных на рис. 6.1, 6.4, 6.9, 6.18, 15.9, 15.10.

4. Получите выражения для мгновенных значений тока в цепи и напряжения на реактивных элементах рис. 15.1 и 15.3 при пода-

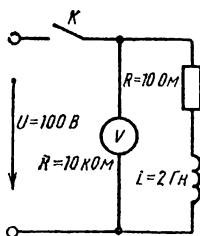


Рис. 15.11

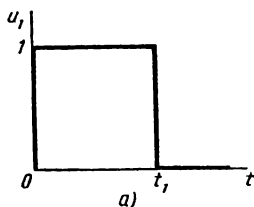
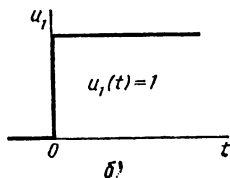


Рис. 15.12 →



че на них скачкообразного напряжения. Начертите кривые мгновенных напряжений на элементах и токов в ветвях.

5. Возможны ли такие случаи, когда при подключении RL -или RC -цепи к источнику напряжения переходный процесс в цепях отсутствует? Если возможны, то при каких условиях?

6. Может ли при подключении RC -цепи к источнику напряжения на конденсаторе оказаться больше напряжения входного источника? Если может, то при каких условиях и в течение какого времени?

7. Изобразите форму напряжения на выводах вольтметра для схемы рис. 15.11 после размыкания ключа K .

8. Рассчитайте и начертите соответствующие кривые напряжения на выходе $u_2(t)$, входного тока $i_1(t)$ для цепей, указанных в п. 3, если входной сигнал имеет вид: а) рис. 15.12, а; б) рис. 15.12, б.

Лабораторная работа № 16

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ВТОРОГО ПОРЯДКА

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по [1] § 6.2; 2) изучить описание данной работы; 3) выполнить предварительный расчет; 4) заготовить 6 калек по диаметру экрана осциллографа; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

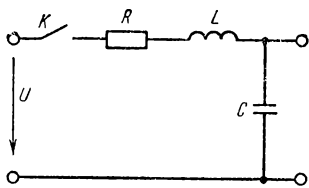


Рис. 16.1

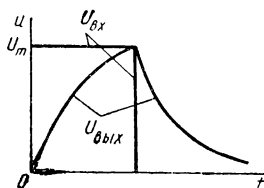


Рис. 16.2

Цель работы: изучить переходные процессы в цепях второго порядка при подключении цепи к источникам постоянного и гармонического напряжений.

Если к входу схемы рис. 16.1 подключить источник постоянного напряжения E , то при малых затуханиях ($R < 2\sqrt{L/C}$, следовательно, $Q > 0,5$) переходный процесс имеет колебательный характер, причем принужденная составляющая напряжения на конденсаторе равна напряжению источника $u_{C\text{пр}} = E$, а свободная —

$u_{C\text{св}} = Ee^{-\sigma t} \sin \omega_{\text{св}} t$, где $\omega_{\text{св}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ — частота свободных колебаний в цепи; $\sigma = R/(2L)$. Время практического существования переходного процесса $t_{\text{пер}}$ определяется временем затухания экспоненты $e^{-\sigma t}$, которое составляет $(3 \div 5) \frac{1}{\sigma} = (3 \div 5) \frac{2L}{R} \frac{\omega_{\text{св}}}{\omega_{\text{св}}} = (3 \div 5) \frac{2Q}{\omega_{\text{св}}}$. За время $t_{\text{пер}}$ укладывается N периодов свободной

составляющей, причем $N = \frac{t_{\text{пер}}}{T_{\text{св}}} = \frac{(3 \div 5) 2Q \omega_{\text{св}}}{\omega_{\text{св}} 2\pi} \approx Q$.

При колебательном режиме корни характеристического уравнения цепи комплексно сопряженные: $p_{1,2} = -\sigma \pm j\omega_{\text{св}} = -\frac{\omega_{\text{св}}}{2Q} \pm j\omega_{\text{св}}$.

Отношение собственной частоты контура к затуханию равно $2Q$. Так как $Q = N$, то $N = \omega_{св}/(2\sigma)$ или $\sigma = \omega_{св}/(2N)$. Таким образом, число периодов, укладывающихся за практическое время переходного процесса, приблизительно равно добротности контура Q . Свободные колебания затухают тем быстрее, чем меньше добротность контура и чем больше, при прочих равных условиях, собственная частота контура $\omega_{св}$. Зная цену деления шкалы по горизонтали на экране осциллографа и число периодов свободных колебаний, можно определить затухание цепи.

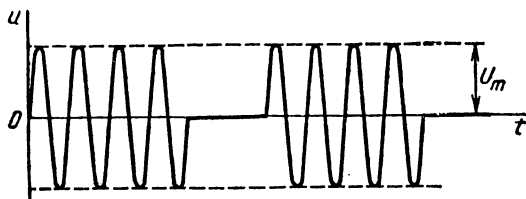


Рис. 16.3

Если затухание цепи велико ($R > 2\sqrt{L/C}$ или $Q < 0,5$), то свободная составляющая представляет собой разность двух экспонент и отклик на выходе имеет аperiодический (неколебательный) характер (рис. 16.2). При $R = R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$ режим является критическим, т. е. промежуточным между колебательным и аperiодическим.

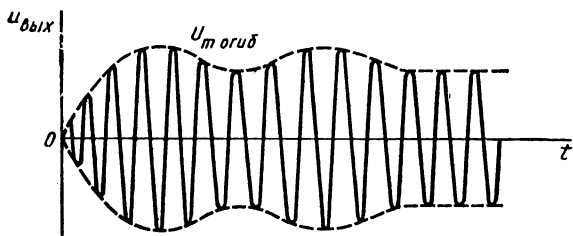


Рис. 16.4

При подключении к входу высокодобротной RLC -цепи радиопимпульса с высокочастотным заполнением, т. е. сигналов гармонической формы с паузами (рис. 16.3), могут иметь место два случая. При частоте внешнего воздействия, незначительно отличающейся от собственной частоты контура, входное напряжение представляет собой сумму двух колебаний с различными частотами (ω и $\omega_{св}$), причем амплитуда вынужденной составляющей остается неизменной, а амплитуда свободной составляющей уменьшается во времени. При этом получаются биения, частота которых Ω определяется полуразностью частот свободной и вынужденной составляющих: $\Omega = (\omega - \omega_{св})/2$.

Огибающей называют воображаемую кривую, показывающую закон изменения выходного мгновенного напряжения (на рис. 16.4 показана пунктиром). В нашем случае

$$U_{C \text{ отб}} = \frac{U_m Q}{\sqrt{1+\xi^2}} \sqrt{1 + e^{-2\sigma t} - 2e^{-\sigma t} \cos \Omega t},$$

где U_m — максимальное значение входного напряжения. Если собственная частота контура $\omega_{св}$ и частота приложенного напряжения ω равны, то $\Omega = 0$ и биения отсутствуют. Огибающая выходного напряжения $U_{C \text{ огиб}} = U_m Q (1 - e^{-\sigma t})$.

Очевидно, что при $\omega = \omega_{св}$ амплитуда напряжения u_C нарастает монотонно, причем чем больше добротность, тем медленнее нарастает и спадает огибающая напряжения, т. е. тем сильнее явление «затягивания» фронта огибающей (рис. 16.5).

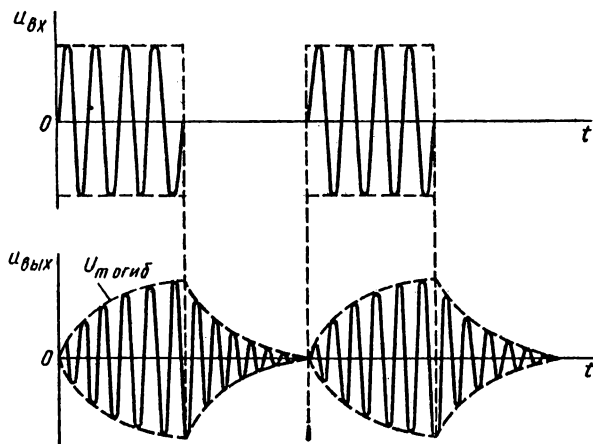


Рис. 16.5

При увеличении скорости передачи сигналов время паузы между ними уменьшается, сигнал «смазывается», искажения увеличиваются. Чтобы уменьшить влияние «затягивания», нужно увеличить затухание (уменьшить добротность), что, в свою очередь, приводит к ухудшению избирательных свойств контура в вынужденном режиме.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать значение критического сопротивления контура $R_{кр}$ (рис. 16.1). Исходные данные берут по варианту задания.

2. Найти частоту свободных колебаний исследуемого контура.

Задание. Исследовать переходный процесс: а) в неразветвленной цепи с различными затуханиями и при ее подключении к источнику постоянного напряжения; б) в неразветвленной цепи с малым затуханием при подключении цепи к источнику гармонического напряжения (при воздействии на цепь радиоимпульсов).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 16.6. Регуляторы генератора установить в позиции, при которых на его выходе будет напряжение П-образной формы с периодом в 10 раз большим, чем период собственных колебаний исследуемого контура.

2. Зарисовать кривые, напряжения на входе и выходе исследуемой цепи при различных значениях сопротивления

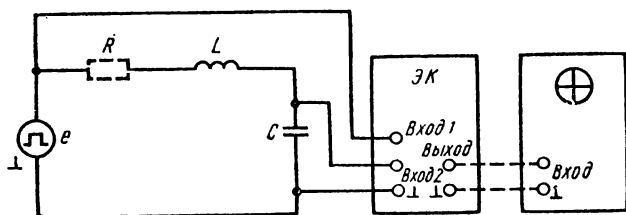
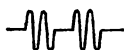


Рис. 16.6

R и длительностях T входного сигнала. Изменять сопротивление R от значения много меньшего критического до значения много большего критического. Определить добротность цепи при $Q > 1$.

3. Переключатель вида сигналов генератора Π_Φ устано-

вить в положение



Изменять часто-

ту от $0,75 f_0$ до $1,5 f_0$. Зарисовать напряжения на входе и выходе цепи при различных добротностях.

Обработка результатов измерений

1. На горизонтальной оси кривых, зарисованных с экрана осциллографа, указать цену деления в единицах времени.

2. Сравнить частоту свободных колебаний, критическое сопротивление и частоту биений, полученные экспериментально, с аналогичными величинами, найденными теоретически.

3. Определить корни характеристического уравнения, соответствующие кривым в колебательном режиме, полученным экспериментально.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В каких случаях свободная составляющая напряжения на конденсаторе в RLC -цепи изменяется: а) по колебательному; б) по апериодическому законам?

2. Сколько колебаний практически совершит свободная составляющая за время переходного процесса, если корни характеристического уравнения, описывающего свободный процесс, $p_{1,2} = (-300 \pm j3140) \text{ с}^{-1}$?

3. Цепь рис. 16.1 ($R = 20 \text{ Ом}$; $L = 16,6 \text{ мГн}$; $C = 5,92 \text{ мкФ}$) питается от источника постоянного напряжения. Рассчитайте декремент затухания, практическое время переходного процесса, число периодов, укладывающихся за время переходного процесса.

4. Как будут изменяться σ в задаче п. 3, если увеличить: а) сопротивление R ; б) индуктивность L ; в) емкость C ?

При каких значениях параметров элементов режим становится критическим?

5. Через какое время в цепи (см. п. 3) амплитуда свободной составляющей уменьшится: а) в 2 раза; б) в 5 раз; в) в 10 раз; г) в 20 раз; д) в 100 раз по сравнению с амплитудой в начальный момент времени?

6. Через какое время после замыкания ключа K в схеме рис. 16.7 ток в цепи достигнет наибольшего значения? Определите наибольшее значение тока i_{\max} , если $L = 10 \text{ мГн}$; $C = 1 \text{ мкФ}$; $R = 1 \text{ кОм}$; $U_{C_0} = 10 \text{ В}$.

7. Какой характер имеют процессы в RLC -цепи с малым затуханием при подключении цепи к источнику синусоидального напряжения, если: а) $\omega \approx \omega_{св}$; б) $\omega = \omega_{св}$?

8. Докажите, что число свободных колебаний N близко к добротности цепи Q .

9. Что произойдет с практическим временем переходного процесса, если собственную частоту контура $\omega_{св}$ уменьшить?

10. Изобразите форму напряжения на индуктивном элементе в цепи рис. 16.1. Сравните ее с формой напряжения на емкостном элементе. Что в этих кривых общего и чем они отличаются друг от друга?

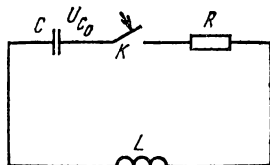


Рис. 16.7

Лабораторная работа № 17

ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ ПРОХОДНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

При подготовке к выполнению работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 8.2; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 17.1—17.3; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментально определить характеристические параметры симметричных проходных четырехполюсников.

Для расчета характеристического сопротивления симметричного четырехполюсника \underline{Z}_c и постоянной передачи Γ , а также первичных параметров четырехполюсника необходимо найти входное сопротивление четырехполюсника в предельных режимах т. е. в режимах холостого хода и короткого замыкания. Например, A -параметры симметричного четырехполюсника $\underline{A}_{11} = \sqrt{\underline{Z}_x/(\underline{Z}_x - \underline{Z}_k)}$; $\underline{A}_{12} = = \underline{A}_{11} \underline{Z}_k$; $\underline{A}_{21} = \underline{A}_{11}/\underline{Z}_x$; $\underline{A}_{22} = \underline{A}_{11}$.

Характеристическим сопротивлением \underline{Z}_c симметричного четырехполюсника называют сопротивление, при подключении которого к выходным зажимам входное сопротивление четырехполюсника оказывается равным сопротивлению нагрузки (рис. 17.1). Характеристическое сопротивление \underline{Z}_c можно определить экспериментально из опытов холостого хода и короткого замыкания: $\underline{Z}_c = = \sqrt{\underline{Z}_x \underline{Z}_k} = \sqrt{\underline{A}_{12}/\underline{A}_{21}}$.

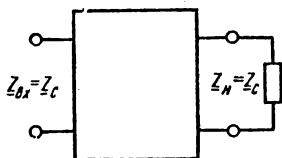


Рис. 17.1

Характеристической постоянной передачи $\underline{\Gamma}$ симметричного четырехполюсника называют натуральный логарифм отношения комплексных действующих значений напряжений (токов) на входе и выходе неавтономного проходного четырехполюсника, нагруженного на цепь сопротивлением, равным характеристическому: $\underline{\Gamma} = \ln(\underline{U}_1/\underline{U}_2) = = \ln(\underline{I}_1/\underline{I}_2) = A + jB$.

Вещественная часть постоянной передачи (постоянная ослабления четырехполюсника A) характеризует уменьшение действующего напряжения (тока) при передаче энергии от источника к нагрузке через четырехполюсник при работе его на согласованную нагрузку: $A = \ln U_1/U_2 = \ln I_1/I_2$, откуда $U_2 = U_1 e^{-A}$. Мнимая часть постоянной передачи (постоянная фаза четырехполюсника B) равна разности начальных фаз этих напряжений (токов): $B = \psi_{U_1} - \psi_{U_2} = = \psi_{I_1} - \psi_{I_2}$ или $\psi_2 = \psi_1 + B$.

При расчетах по приведенным формулам постоянную ослабления выражают в неперах (Нп), а постоянную фазы — в радианах (рад). Измерительную аппаратуру градуируют в децибелах и градусах, причем 1 Нп = 8,68 дБ; 1 дБ = 0,115 Нп; 1 рад = 57,3°, 1° = 0,017452 рад.

Постоянную передачи $\underline{\Gamma}$ можно определить экспериментально из опытов холостого хода и короткого замыкания или рассчитать по известным значениям первичных параметров четырехполюсника: $\text{th } \underline{\Gamma} = \sqrt{\underline{Z}_k/\underline{Z}_x}$; $e^{\underline{\Gamma}} = (\underline{A}_{11} + \sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}})$, откуда $\underline{\Gamma} = \text{arth } \times \times \sqrt{\underline{Z}_k/\underline{Z}_x} = \ln(\underline{A}_{11} + \sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}}) = 2,3 \cdot \lg(\underline{A}_{11} + \sqrt{\underline{A}_{12}\underline{A}_{21}})$. Для симметричных четырехполюсников справедливы также следующие соотношения:

$$\underline{A}_{11} = \text{ch } \underline{\Gamma}; \quad \underline{A}_{12} = \underline{Z}_c \text{ sh } \underline{\Gamma}; \quad \underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_c} \text{ sh } \underline{\Gamma}; \quad \underline{A}_{22} = \underline{A}_{11}.$$

Основные уравнения четырехполюсника в А-форме записи:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\Gamma} + \dot{I}_2 \underline{Z}_c \operatorname{sh} \underline{\Gamma};$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\Gamma} + \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} \underline{\Gamma}.$$

Зная сопротивления холостого хода и короткого замыкания, уравнения четырехполюсника можно записать во всех формах (\underline{A} , \underline{Y} , \underline{Z} , \underline{H} и т. д.), поскольку первичные параметры связаны между собой известными формулами перехода [1].

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать комплексные сопротивления холостого хода \underline{Z}_x и короткого замыкания \underline{Z}_k для четырехполюсника рис. 17.2, если $R = 100$ Ом; $\bar{C} = C_3$, а также показания приборов U_1 и фазометра φ (рис. 17.3), если $R_{ш} = 1$ Ом. Напряжение U_1 и частоту f выбирают в соответствии с вариантом задания (например, $U_1 = 5$ В, f (кГц) = $\frac{77}{R(\text{кОм})C(\text{нФ})}$).

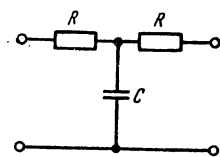


Рис. 17.2

Результаты расчетов занести в табл. 17.1

2. Найти характеристическое сопротивление $\underline{Z}_c = R_c + jX_c$ и постоянную передачи исследуемого четырехполюсника $\underline{\Gamma} = A + jB$; получившиеся комплексные величины записать в алгебраической форме.

3. Вычислить \underline{A} -, \underline{Y} -, \underline{Z} -, \underline{H} -, \underline{B} -G-параметры четырехполюсника в зависимости от варианта задания, определяемого номером стенда.

4. Определить действующее значение и начальную фазу выходного напряжения, если четырехполюсник нагружен на резистор, сопротивление которого равно характеристическому, $U_1 = 5$ В, а начальная фаза входного напряжения нулевая.

Задание. Экспериментально определить характеристическое сопротивление, постоянную передачи и А-параметры симметричного проходного четырехполюсника.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 17.3. Установить на генераторе частоту f , выходное напряжение U_1 . Выходное сопротивление генератора должно быть минимальным. Измерить комплексное входное сопротивление исследуемого четырехполюсника в режимах холостого хода и короткого

Таблица 17.1

[illegible]

Таблица 17.2

[illegible]

Таблица 17.3

Рассчитано для четырехполюсника															
Т-вида											П-вида				
$\underline{Z}_{\text{х}}, \underline{\text{Ом}}$	$\underline{Z}_{\text{к}}, \underline{\text{Ом}}$	$\underline{Z}_{\text{с}}, \underline{\text{Ом}}$	Γ	$\underline{Z}_{\text{вх}}$ при $\underline{Z}_{\text{н}} = \underline{Z}_{\text{с}}, \underline{\text{Ом}}$	\underline{A}_{11}	$\underline{A}_{12}, \underline{\text{Ом}}$	$\underline{A}_{21}, \underline{\text{Ом}}^{-1}$	\underline{A}_{22}	$\underline{Z}_{1\Gamma}, \underline{\text{Ом}}$	$\underline{Z}_{2\Gamma}, \underline{\text{Ом}}$	$\underline{Z}_{3\Gamma}, \underline{\text{Ом}}$	$\underline{Z}_{1\text{П}}, \underline{\text{Ом}}$	$\underline{Z}_{2\text{П}}, \underline{\text{Ом}}$	$\underline{Z}_{3\text{П}}, \underline{\text{Ом}}$	$\underline{Z}_{\text{с}}, \underline{\text{Ом}}$

Примечание. Для расчета параметров в системах, отличных от А составляется таблица, аналогичная 17.3.

замыкания. Результаты данного и последующих измерений занести в табл. 17.2.

2. Точку M соединить с точкой 2. Четырехполюсник оказывается нагруженным на резистор, сопротивление которого равно характеристическому. Записать показания приборов U_I и φ .

3. Потенциальный вывод фазометра P отключить от точки B и подключить к точке M . Замкнуть накоротко резистор $R_{ш}$. При этом измеряется действующее значение U_2 и аргумент φ_2 выходного напряжения.¹

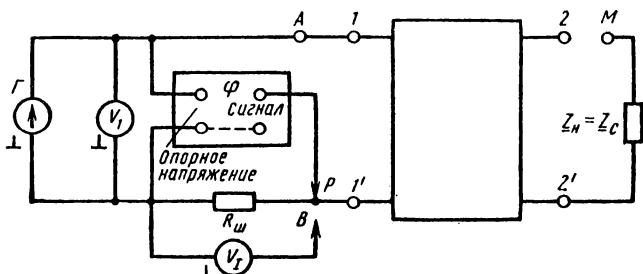


Рис. 17.3

4. Снять перемычку, замыкающую $R_{ш}$. Проводник P отключить от точки M и подключить снова к точке B . Разомкнуть точки 1 и A , M и 2. Точку A соединить с точкой M . При этом измеряется сопротивление $Z = R_c - jX_c$. Записать показания приборов φ и U_I . Если эти показания близки к полученным в п. 2, то данное сопротивление является характеристическим сопротивлением исследуемого четырехполюсника.

Обработка результатов измерений

1. Результаты расчетов п. 1—6 порядка выполнения работы занести в табл. 17.3. Рассчитать по экспериментальным данным сопротивления \underline{Z}_x , \underline{Z}_k , $\underline{Z}_{вх}$, \underline{Z}_c , постоянную четырехполюсника $\underline{\Gamma} = A + jB$ и сравнить полученные значения с аналогичными, найденными при предварительном расчете.

2. Рассчитать по экспериментальным данным $\underline{Z}_{вх}$ четырехполюсника, нагруженного на $\underline{Z}_н = \underline{Z}_c$.

3. Выразить значение постоянной ослабления A в непах и децибелах.

4. Определить A -параметры четырехполюсника по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания.

5. Записать уравнения данного четырехполюсника в Z и Y -формах.

6. Заменить исследуемый Т-образный четырехполюсник эквивалентным П-образным. Вычислить сопротивления элементов эквивалентного П-образного четырехполюсника.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие системы параметров четырехполюсников вы знаете?
 2. Каков физический смысл параметров A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} ?
 3. Докажите, что для взаимного четырехполюсника $\underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{12}\underline{A}_{21} = 1$.
 4. Каким образом можно рассчитать параметры четырехполюсника по опытам холостого хода и короткого замыкания?
 5. В симметричном четырехполюснике $A_{11} = 400$; $A_{12} = 500$ Ом. Определите Z_x и Z_K .
 6. Дано: $Z_x = 100$ Ом; $Z_K = 50$ Ом. Найдите A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} , Z_c и $Z_{вх}$ четырехполюсника, нагруженного на Z_c .
 7. Рассчитайте постоянную ослабления A по условиям предыдущей задачи. Выразите затухание в неперях и децибелах. Вычислите напряжение на выходе четырехполюсника, если $U_1 = 10$ В.
 8. Дано: $Z_K = 100 e^{j80^\circ}$; $Z_x = 50 e^{j50^\circ}$. Найдите A и B .
- Напомним, что $\operatorname{th} \underline{\Gamma} = \frac{e^{\underline{\Gamma}} - e^{-\underline{\Gamma}}}{e^{\underline{\Gamma}} + e^{-\underline{\Gamma}}} = \frac{e^{\frac{2\underline{\Gamma}}{2}} - 1}{e^{\frac{2\underline{\Gamma}}{2}} + 1}$. Если $e^A e^{jB} = Me^{j\psi}$, то $e^A = M$; $B = \psi$.
9. Дано: $\underline{\Gamma} = 0,5 + j1$; $Z_c = 50 e^{j30^\circ}$; $\underline{\Gamma} = A + jB$; A — в Нп; B — в рад. Рассчитайте Z_x и Z_K .
 10. Получите выражение для \underline{U}_1 и \underline{I}_1 , если $Z_H = Z_c$.
 11. Запишите уравнения четырехполюсника по исходным данным задач 5—9 в Y -, Z - и H формах.

Лабораторная работа № 18

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ТИПА k

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 8.4; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 18.1; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Цель работы: исследовать АЧХ и ФЧХ, передаточные характеристики фильтров нижних и верхних частот, а также полосовых фильтров типа k .

Фильтрами называют четырехполюсники, пропускающие колебания одних частот с малым затуханием, а других — с большим. Каждый фильтр имеет полосы прозрачности (пропускания) и непрозрачности (затухания).

Фильтром нижних частот (ФНЧ) называют четырехполюсник, у которого затухание в диапазоне от $f = 0$ до частоты среза $f_{ср}$ мало, а в диапазоне от $f_{ср}$ до $f = \infty$ велико (рис. 18.1, а).

Фильтр верхних частот (ФВЧ) обеспечивает большое затухание в диапазоне от $f = 0$ до $f = f_{ср}$ и малое — в диапазоне от $f_{ср}$ до $f = \infty$ (рис. 18.1, б). Полосовые фильтры имеют АЧХ вида рис. 18.2, а, а режекторные (заградительные) — рис. 18.2, б. В данной работе рассматриваются реактивные LC-фильтры.

Свойства фильтров определяются видом соединения катушек и конденсаторов. Для построения ФНЧ необходимо, чтобы продольные элементы фильтра имели индуктивный характер, а поперечные — емкостный (рис. 18.3). В этом случае на нижних частотах сопротивление продольных ветвей оказывается малым, а

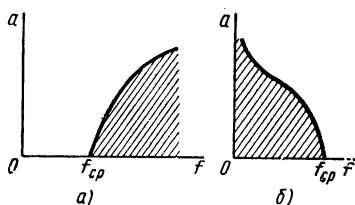


Рис. 18.1

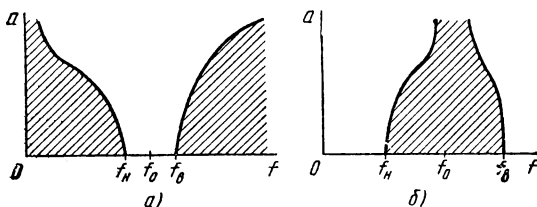


Рис. 18.2

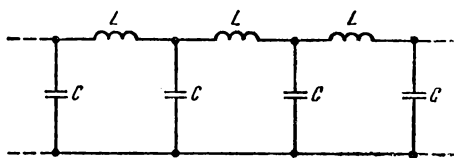


Рис. 18.3

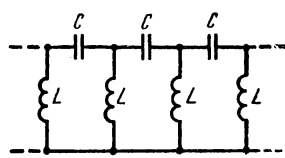


Рис. 18.4

поперечных — большим. При этом коэффициент передачи близок к единице, а постоянная ослабления входного сигнала — к нулю. С увеличением частоты сопротивление элементов возрастает, а поперечных — падает, затухание возрастает, коэффициент передачи — уменьшается. Продольные элементы ФВЧ, наоборот, имеют емкостный, а поперечные — индуктивный характер (рис. 18.4).

Схемы рис. 18.3 и 18.4 называют *лестничными*. Лестничную цепь можно разбить на отдельные звенья. Различают Т-, П- и Г-образные звенья (рис. 18.5), причем Т- и П-образные звенья можно предста-

вить в виде двух соединенных Г-образных звеньев. Частота среза ФНЧ и ФВЧ определяется резонансной частотой Г-образных звеньев данных фильтров. Следовательно, в ФНЧ $\omega_{cp} = \frac{1}{\sqrt{0,5h \cdot 0,5C}} =$

$$= \frac{2}{\sqrt{LC}}; f_{cp} = \frac{1}{\pi \sqrt{LC}}, \text{ в ФВЧ } \omega_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2L \cdot 2C}} = \frac{1}{2\sqrt{LC}}; f_{cp} = \frac{1}{4\pi \sqrt{LC}}.$$

Фильтры, в которых произведение сопротивлений продольного и поперечного плеч имеет постоянное значение, не зависящее от частоты, называют фильтрами типа k . Для схем рис. 18.3 и 18.4 $j\omega L = \frac{1}{j\omega C} = \frac{L}{C} = \text{const.}$

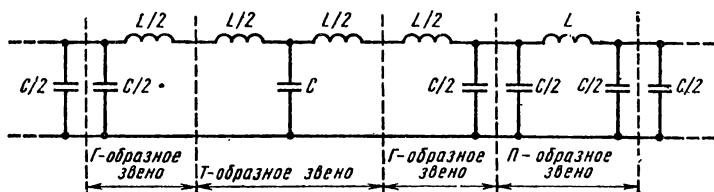


Рис. 18.5

Характеристическое сопротивление Z_c фильтров типа k , т. е. сопротивление цепи, к которой следует подключить фильтр, чтобы его входное сопротивление равнялось нагрузочному, в рассматриваемых фильтрах зависит от отношения данной частоты f к частоте среза f_{cp} .

Для Т-образных звеньев ФНЧ характеристическое сопротивление

$$Z_{c(T)} = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{1 - (f/f_{cp})^2}, \text{ для П-образных } - Z_{c(П)} = \frac{\sqrt{L/C}}{\sqrt{1 - (f/f_{cp})^2}}.$$

Если реактивный фильтр при любой частоте согласован с нагрузкой, т. е. нагружен на резистор, сопротивление которого равно характеристическому, то в полосе прозрачности постоянная ослабления фильтра $A = 0$, а в полосе затухания для Т- и П-образных звеньев ФНЧ $A_z = \text{arch} [2 (f/f_{cp})^2 - 1]$, для Г-образного звена в два раза меньше, а для Т- и П-образных звеньев ФВЧ $A_z = \text{arch} \times [1 - 2 (f_{cp}/f)^2]$; $A_{(Г)} = 0,5 A_{(Т)} = 0,5 A_{(П)}$. Если резистивная составляющая входного сопротивления фильтра отлична от нуля, то затухание в полосе пропускания оказывается больше нуля, а в полосе затухания — меньше, чем рассчитанное по указанным формулам. В приведенных выражениях постоянная ослабления фильтра A выражена в неперах. Формулы перехода: $A_{(дБ)} = 8,68 A_{(Нп)}$ или $A_{(Нп)} = 0,115 A_{(дБ)}$.

Коэффициент фазы для Т- и П-образных звеньев ФНЧ в полосе прозрачности $B_{пр} = \arccos[1 - 2 (f/f_{cp})^2]$, в полосе затухания $B_z = \pi = \text{const}$ для Г-образного звена B уменьшается в два раза. Для Т- и П-образных звеньев ФВЧ в полосе прозрачности $B_{пр} = \arccos \times [1 - 2 (f_{cp}/f)^2]$, в полосе затухания $B_z = -\pi = \text{const}$. Во всех

приведенных выражениях коэффициент фазы B выражен в радианах. Для Г-образных звеньев $B_{(Г)} = 0,5 B_{(Т)} = 0,5 B_{(П)}$. В продольном звене полосовых фильтров на частоте f_0 имеет место резонанс напряжений, а в поперечном — резонанс токов. Очевидно, что в продольном плече индуктивная катушка и конденсатор должны быть включены последовательно, а в поперечном — параллельно, причем резонансные частоты плеч должны быть одинаковыми. Схема Г-образного звена полосового фильтра типа k показана на рис. 18.6. Так как в данной цепи $L_1 C_1 = L_2 C_2$, то $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1} = 1/\sqrt{L_2 C_2}$. При $f < f_0$ сопротивление продольных плеч имеет емкостный характер, а поперечных — индуктивный. Следовательно, для частот ниже резонансной эквивалентная схема цепи имеет вид рис. 18.7. При $f > f_0$ продольное плечо имеет индуктивный, а поперечное — емкостный характер (рис. 18.8), т. е. получается ФНЧ. Таким образом, полосовой фильтр представляет собой как бы два

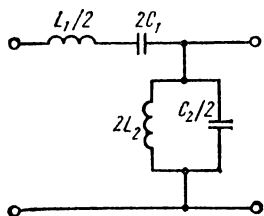


Рис. 18.6

фильтра — верхних и нижних частот, соединенных вместе. Частоты среза полосового фильтра $f_{н.в} = \frac{\omega_0}{2\pi} \left[\sqrt{q+1} \pm \sqrt{q} \right]$, где $q = L_2/L_1 = C_2/C_1$, причем $f_0 = \sqrt{f_{н.в}}$, т. е. резонансная частота каждого контура равна среднему геометрическому частот среза f_n и f_v . Если фильтр

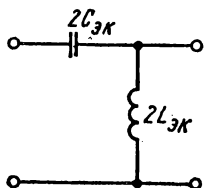


Рис. 18.7

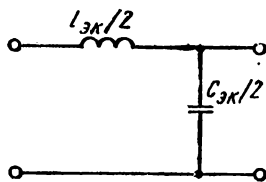


Рис. 18.8

нагружен на резистор, сопротивление которого равно характеристическому, то постоянная ослабления в полосе затухания

$$A_3 = \operatorname{arch} \left[1 - \frac{C_2}{2C_1} (f/f_0 - f_0/f)^2 \right].$$

В диапазоне от $f = 0$ до $f = f_n$ ФЧХ $B = \pi = \text{const}$; в диапазоне от f_n до f_v $B = \arccos \left[1 - \frac{C_1}{2C_2} (f/f_0 - f_0/f)^2 \right]$, в диапазоне от $f = f_v$ до $f = \infty$ $B = 180^\circ = \text{const}$.

К недостаткам фильтров типа k относятся сильная зависимость характеристического сопротивления от частоты и недостаточная скорость нарастания затухания в полосе непрозрачности. Например, при частоте $f = 1,75 f_{ср}$ затухание Т и П-образных звеньев составляет 20 дБ, что соответствует ослаблению по напряжению в 10 раз, а

для Г-образного звена — 14 дБ (5 раз). Достоинствами фильтров типа k являются возрастание затухания при увеличении частоты в диапазоне от $f_{ср}$ до $f = \infty$; простота конструкции фильтра.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать частоту среза $f_{ср}$ ФНЧ и сопротивление $\rho = \sqrt{L_1/C_1}$ для схемы рис. 18.9.
2. Найти частоту среза $f_{ср}$ ФВЧ и сопротивление $\rho = \sqrt{L_1/C_1}$ для схемы рис. 18.10.

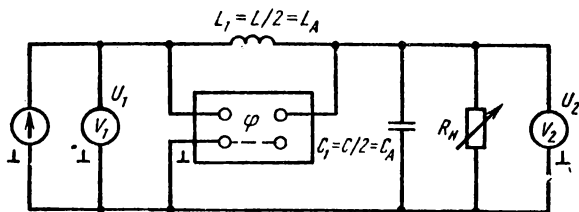


Рис. 18.9

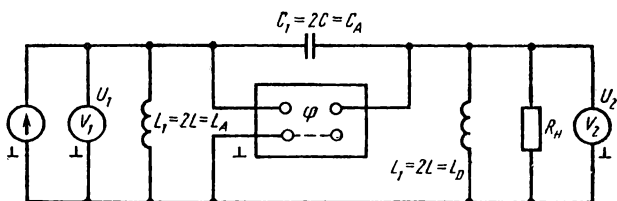


Рис. 18.10

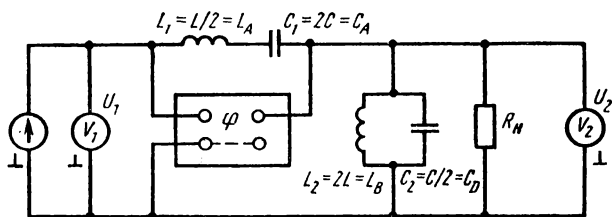


Рис. 18.11

3. Сравнить произведения L_1C_1 и L_2C_2 (рис. 18.11), определить резонансную частоту f_0 , частоты среза f_n , f_v и сопротивление $\rho = \sqrt{L_2/C_2}$.

Задание. Снять АЧХ и ФЧХ фильтров НЧ, ВЧ и полосового типа k .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снять АЧХ и ФЧХ фильтра нижних частот типа k . Для этого собрать цепь по схеме рис. 18.9. В качестве катушки $L/2$ использовать L_A , а в качестве конденсатора $C/2$ — конденсатор C_A . Установить $R_H = 0,8 \rho$. Напряжение U_1 , заданное по варианту, определяемому номером стенда (например, $U_1 = 5$ В), поддерживать неизменным.

2. Снять АЧХ и ФЧХ коэффициента передачи по напряжению ФНЧ в диапазоне от $f = 0,1 f_{cp}$ до $f = 2 f_{cp}$ через $0,1 f_{cp}$. Результаты измерений занести в табл. 18.1.

3. Последовательно с катушкой L_A включить резистор сопротивлением $R = 100$ Ом. Прodelать аналогичные эксперименты.

4. Закоротить резистор R и снять частотные характеристики при $R_H = 2 \rho$.

5. Исследовать П-образный ФВЧ типа k . Для этого собрать цепь по схеме рис. 18.10 и снять АЧХ и ФЧХ в диапазоне от $0,2 f_{cp}$ до $2 f_{cp}$ через $0,1 f_{cp}$.

6. Исследовать Г-образное звено полосового фильтра типа k . Для этого собрать цепь по схеме рис. 18.11, снять АЧХ и ФЧХ в диапазоне от $0,1 f_{cp}$ до f_0 , причем в диапазоне от $0,1 f_H$ до $2 f_0$ — через 200 Гц, в диапазоне от f_H до f_B — через 500 Гц, в диапазоне от f_B до $2 f_0$ — через 1000 Гц.

Т а б л и ц а 18.1

$f_{cp} = ; \rho = ; U_1 = ; L_1 = ; C_1 =$						
$f, \text{ Гц}$	f/f_{cp}	Измерено		Вычислено		
		$U_2, \text{ В}$	$\varphi, \text{ град}$	$A, \text{ дБ}$	$A, \text{ Нп}$	$B, \text{ рад}$

Примечание. Для каждого фильтра составляют таблицу аналогичного вида.

Обработка результатов измерений

1. Подсчитать затухание исследованных фильтров на всех частотах, выражая постоянную ослабления A в децибелах и неперах: $A_{(\text{дБ})} = 20 \lg U_1/U_2$; $A_{(\text{Нп})} = \ln U_1/U_2$.

2. Построить кривые $A = F(f)$; $B = F(f)$, кривые для ФНЧ нанести на один график.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какую цепь называют лестничной? Как обозначают элементы Т-, П- и Г-образных звеньев фильтра?
2. Какие фильтры называют фильтрами нижних частот? Составьте схемы Г-, Т-, П-образных звеньев ФНЧ.
3. Рассчитайте частоты среза для Т-, П-, и Г-образных ФНЧ, если емкость конденсаторов 0,1 мкФ, а индуктивность катушек 10 мГн.
4. Определите затухание (дБ), разность начальных фаз и характеристическое сопротивление для: а) $f = 0,5 f_{ср}$; б) $f = 2f_{ср}$ по данным п. 3.
5. Как влияют на АЧХ и ФЧХ фильтра сопротивления потерь индуктивных катушек?
6. Какие фильтры называют фильтрами типа k ? Каковы их достоинства и недостатки?
7. Какие фильтры являются фильтрами верхних частот? Рассчитайте частоту среза цепи рис. 18.10, если индуктивность катушек 10 мГн, а емкость конденсаторов 0,1 мкФ.
8. Рассчитайте постоянную ослабления и характеристическое сопротивление для фильтра рис. 18.10 на частоте $f = 0,5 f_{ср}$.
9. Начертите схему полосового фильтра. Объясните принцип его работы. Нарисуйте кривые затухания такого фильтра.
10. Вычислите частоты f_H , f_0 и f_D для схемы рис. 18.11, если индуктивность катушки 10 мГн, а емкость конденсатора 0,1 мкФ.
11. Определите затухание, коэффициент фазы и характеристическое сопротивление фильтров, рассмотренных в п. 10 на частотах: а) $f = 0,5 f_H$; б) $f = 2f_D$.

Лабораторная работа № 19

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ И ВЕРХНИХ ЧАСТОТ ТИПА m

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по книге [3] § 5.13; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 19.1; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Цель работы: изучить ФНЧ и ФВЧ типа m .

Фильтрами нижних и верхних частот типа m называют фильтры, у которых однотипные реактивные элементы находятся как в продольной, так и в поперечной ветвях (рис. 19.1 и 19.2). Наличие дополнительных по сравнению с фильтрами типа k элементов приводит к тому, что свойства фильтров типа m заметно отличаются от фильтров типа k . В фильтрах типа m на некоторой конечной частоте коэффициент передачи оказывается равным нулю. Например, в поперечной ветви схемы рис. 19.1 может иметь место резонанс напряжений. При этом сопротивление поперечной ветви (т. е. выходного элемента) равно нулю, а затухание идеального фильтра бесконечно большое. Аналогично, для фильтра рис. 19.2 на частоте $1/\sqrt{(L_1/2)(C_1/2)}$

возникает резонанс токов. При этом сопротивление продольной ветви — бесконечно большое, коэффициент передачи равен нулю, а затухание — бесконечности. Таким образом, в фильтрах типа m имеется частота, на которой затухание оказывается большим. Такую частоту (рис. 19.3) называют *частотой бесконечного затухания* $f_{\infty}(\omega_{\infty})$. В ФНЧ типа m частоты среза и бесконечного затухания связаны между собой соотношением $f_{\infty} = f_{cp}/\sqrt{1-m^2}$, откуда $m = \sqrt{1-(f_{cp}/f_{\infty})^2}$; в ФВЧ типа m $f_{\infty} = f_{cp}\sqrt{1-m^2}$.

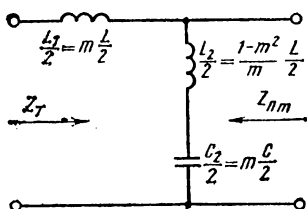


Рис. 19.1

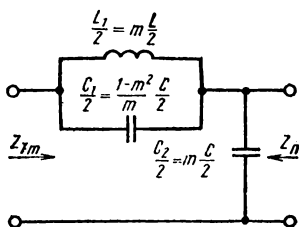


Рис. 19.2

При $m = 1$ фильтр типа m вырождается в фильтр типа k . Если $f_{\infty} = f_{cp}$, то $m = 0$. Таким образом, $m = 0 \div 1$. Однако изготовить фильтр с круто нарастающей частотной характеристикой (что должно было бы иметь место при малых значениях m) практически не уда-

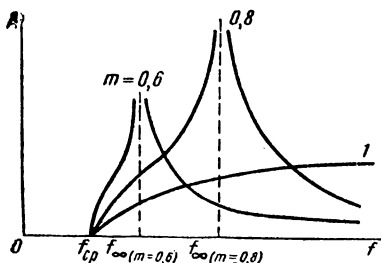


Рис. 19.3

ется (по конструктивным соображениям), поэтому на практике создать фильтры с $m < 0,3 \div 0,35$ на пассивных элементах не представляется возможным. Фильтры типа m получают из звеньев типа k путем переноса части L и C из одной ветви в другую, причем Г-образные звенья исходного фильтра типа k называют *прототипом*. Звенья типа m вида рис. 19.1 называют *последовательно-производными*, а вида рис. 19.2 — *параллельно-производными*. Звенья типа m и k можно соединять между со-

бой в одном фильтре только в случае, когда характеристические сопротивления и частоты среза этих звеньев одинаковы. Чтобы подобное согласование имело место, элементы в производных звеньях должны рассчитываться определенным образом. Например, если Г-образное звено ФНЧ типа k состоит из катушки индуктивностью $L/2$ и конденсатора емкостью $C/2$, то в соответствующем Г-образном звене типа m индуктивность катушки, находящейся в продольной ветви, должна быть равна $m \frac{L}{2}$, а в поперечной $\frac{1-m^2}{m} \frac{L}{2}$.

Емкость конденсатора поперечной ветви составляет $m \frac{C}{2}$, а продоль-

ной $\frac{1-m^2}{m} \frac{C}{2}$. Подобным образом можно показать, что в ФВЧ $C_{\text{прод}} = \frac{2C}{m}$; $L_{\text{прод}} = \frac{2m}{1-m^2} L$; $C_{\text{попер}} = \frac{2m}{1-m^2} C$; $L_{\text{попер}} = \frac{2L}{m}$,

где $2L, 2C$ — индуктивность и емкость звена типа k .

Звенья типа m обеспечивают большое затухание на частотах, близких к частоте среза, а звенья типа k — на частотах, значительно удаленных от частоты $f_{\text{ср}}$.

Таким образом, чем меньше значение m , тем круче нарастает кривая затухания, но тем меньше затухание на частоте f_{∞} и тем быстрее уменьшается затухание на частотах, больших f_{∞} (рис. 19.3). Следовательно, на частотах, близких к $f_{\text{ср}}$, затухание фильтра типа m больше затухания фильтра типа k , а на частотах, значительно больших $f_{\text{ср}}$, — наоборот. Поэтому в реальных фильтрах звенья типа k соединяют последовательно со звеньями типа m , что обеспечивает более равномерную частотную характеристику всего фильтра.

Как показано в работе № 18, недостатком фильтров типа k является сильная зависимость характеристического сопротивления от частоты. Характеристическое сопротивление фильтров типа m также зависит от частоты, однако эта зависимость намного слабее, чем у фильтров типа k . Изменение характеристического сопротивления от частоты менее заметно у фильтров с $m \approx 0,6$, поэтому такие фильтры чаще применяют на практике. Характеристические сопротивления ФНЧ типа m рассчитываются по формулам $Z_{T(m)}$

$$= \frac{Z_T}{\sqrt{1 - (1-m)^2 \left(\frac{f}{f_{\text{ср}}}\right)^2}}; \quad Z_{\Pi(m)} = Z_{\Pi} \sqrt{1 - (1-m)^2 \left(\frac{f}{f_{\text{ср}}}\right)^2},$$

$$\text{где } Z_T = \sqrt{\frac{Z}{C}} \sqrt{1 - (f/f_{\text{ср}})^2}; \quad Z_{\Pi} = \frac{\sqrt{L/C}}{\sqrt{1 - (f/f_{\text{ср}})^2}}$$

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать для схемы рис. 19.4 $L_1/2$; $C_1/2$; $C_2/2$ и частоту бесконечного затухания f_{∞} , если $m = 0,618$.

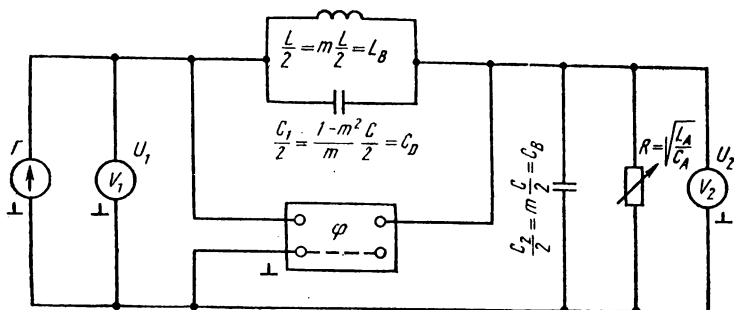


Рис. 19.4

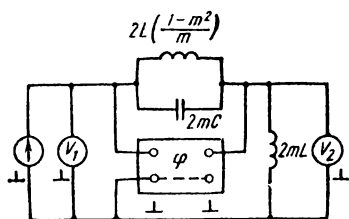


Рис. 19.5

2. Определить элементы схемы и частоту бесконечного затухания для рис. 19.5.

Задание. Экспериментально исследовать АЧХ и ФЧХ фильтров нижних и верхних частот типа m .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 19.4.

2. Снять АЧХ и ФЧХ фильтра нижних частот типа m в диапазоне от $0,1 f_{ср}$ до $2f_{ср}$. На участке от $0,1 f_{ср}$ до $f_{ср}$ устанавливать частоту генератора через $0,1 f_{ср}$, на участке от $f_{ср}$ до $2 f_{ср}$ — через 100—200 Гц. Обратить особое внимание на вид АЧХ в области частоты бесконечного затухания. Результаты измерений занести в табл. 19.1.

3. Аналогичным образом исследовать ФВЧ типа m .

Таблица 19.1

$U_1 =$; $f_{ср} =$; $\rho =$; $m =$; $L_1/2 =$; $L_2/2 =$; $C_1/2 =$							
f , Гц	$f/f_{ср}$	Измерено		Вычислено			
		U_2 , В	φ , град	U_1/U_2	A , дБ	A , Нп	B , рад

Обработка результатов измерений

1. Подсчитать затухания исследованных фильтров на всех частотах, причем постоянную ослабления A выразить в децибелах и неперах: A (дБ) $= 20 \lg U_1/U_2$; A (Нп) $= \ln U_1/U_2$.

2. Построить кривые $A = F(f)$; $B = F(f)$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы отличия фильтров типа m от фильтров типа k ? В каких пределах может изменяться m : а) теоретически; б) практически?

2. Как рассчитать частоту бесконечного затухания фильтров типа m ?

3. Начертите кривые $A = f(\omega)$; $Z_{T(m)} = f(\omega)$; $Z_{П(m)} = f(\omega)$ ФНЧ для различных значений m .
4. Каковы достоинства и недостатки фильтров типа m ?
5. Почему фильтры с $m = 0,6$ получили широкое распространение?
6. Почему в фильтрах звенья m чаще всего объединяют со звеньями типа k ?
7. Начертите схемы последовательно-производного и параллельно-производного звеньев типа m ФНЧ и ФВЧ. Рассчитайте все элементы звеньев, чтобы частота среза совпала с частотой среза звена k .

Лабораторная работа № 20

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ (РЕКОМЕНДУЕТСЯ В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ)

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по книге [2] § 9.3—9.5; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить таблицы для измерений (форму таблиц предлагается выбрать студентам самостоятельно); 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: *изучить некоторые свойства цепей, содержащих управляемые источники.*

Свойства цепей, содержащих управляемые источники тока и напряжения, которые в данной и последующих работах будем называть активными цепями, во многом отличаются от свойств ранее рассмотренных пассивных цепей. Ознакомимся с некоторыми из этих свойств на примере анализа цепей, содержащих операционные усилители, т. е. электронные устройства, состоящие из транзисторов, резисторов и конденсаторов, эквивалентная схема которых содержит источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН).

Операционный усилитель (ОУ) имеет два входных зажима и один выходной. Для нормальной работы ОУ к нему необходимо подключить источник постоянного напряжения (рис. 20.1) *.

Коэффициент усиления μ ОУ велик — порядка десятков тысяч. Так как ОУ является резистивной цепью, то для него справедливы выражения $u_2(t) = \mu u_1(t)$; $U_{m2} = \mu U_{m1}$; $U_{p2} = \mu U_{p1}$ и т. д., где u_1 , u_2 , U_{m1} и U_{m2} , U_1 и U_2 — мгновенные, максимальные, действующие значения напряжений; U_{p1} и U_{p2} — размах напряжений на входе и выходе. Из приведенных выражений следует, что $u_1 = u_2/\mu$. Выходное напряжение ОУ не может превышать напряжения источника питания, следовательно, U_{m2} составляет несколько вольт. Так как коэффициент μ — величина очень большая, то максимальное входное напряжение оказывается малым (порядка нескольких мил-

* Цепь питания показана пунктиром, на последующих схемах эти цепи показываться не будут.

ливольт). По той же причине ток во входной цепи ОУ также мал. При выполнении теоретических расчетов коэффициент усиления ОУ считают бесконечно большим, а входной ток и входное напряжение — близкими к нулю.

Рассмотрим простейшую цепь, содержащую ОУ (рис. 20.2). Один из входных зажимов называют *обратным* или *инвертирующим*, другой — *прямым* или *неинвертирующим*. Инвертирующий вход на схемах обозначают знаком минус (кружком на ОУ), а прямой — знаком плюс. Напряжение на выходе имеет фазу, противоположную фазе сигнала на инвертирующем и совпадающую по фазе с сигналом на

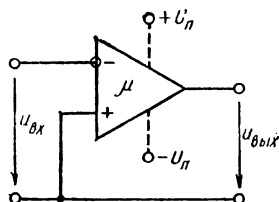


Рис. 20.1

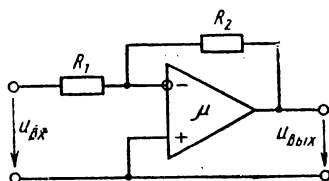


Рис. 20.2

прямым входе. Так как напряжение источника, подводимое к входу ОУ, обычно значительно превышает единицы милливольт, то последовательно с входным зажимом включают резистор с достаточно большим сопротивлением R_1 . Элемент, включенный между выходным и входным зажимами ОУ (в данной схеме резистор R_2), называют *элементом обратной связи*. Цепь обратной связи изменяет свойства

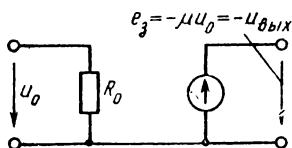


Рис. 20.3

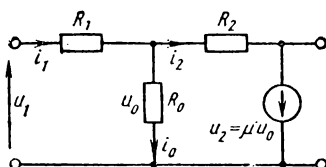


Рис. 20.4

устройств с ОУ. Если цепь обратной связи включить между выходным и входным инверсным зажимами, то обратная связь будет отрицательной, а если между выходным зажимом и прямым входом, то — положительной. Отрицательная обратная связь (ООС) уменьшает усиление, даваемое каскадом, но улучшает характеристики цепи (полосу пропускания, устойчивость и т. д.). Положительная обратная связь (ПОС) увеличивает усиление и может привести к неустойчивому состоянию цепи.

Рассмотрим эквивалентные схемы цепей с ОУ. Эквивалентная схема ОУ, учитывающая конечное значение входного сопротивления, показана на рис. 20.3. Знак минус у выходного напряжения указывает на то, что входное напряжение подведено к инвертирующему входу ОУ. Эквивалентная схема цепи рис. 20.2 показана на рис. 20.4.

Рассчитаем коэффициент передачи по напряжению K для схемы рис. 20.4. Составим уравнения по закону Кирхгофа:

$$i_1 = i_2 + i_0; \quad (20.1)$$

$$u_1 = R_1 i_1 + u_0 = R_1 i_1 + u_2/\mu; \quad (20.2)$$

$$-u_2 = -u_0 + R_2 i_2 = -u_2/\mu + R_2 i_2; \quad (20.3)$$

$$-u_2 = \mu u_0. \quad (20.4)$$

Определив i_1 из (20.2), i_2 из (20.3), подставим их значения в (20.1). Из (20.2) найдем $\mu u_1 = \mu R_1 i_1 + u_2$, а из (20.3) — $\mu u_2 = -u_2 + \mu R_2 i_2$, откуда

$$i_1 = (\mu u_1 - u_2)/(\mu R_1); \quad i_2 = (u_2 - \mu u_2)/(\mu R_2);$$

$$i_0 = -u_0/R_0.$$

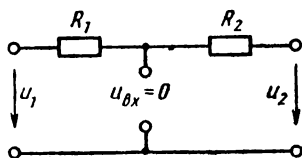


Рис. 20.5

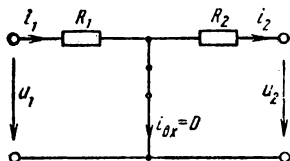


Рис. 20.6

Тогда

$$\frac{\mu u_1 - u_2}{\mu R_1} = \frac{u_2 - \mu u_2}{\mu R_2} - \frac{u_2}{\mu R_0},$$

или после элементарных преобразований

$$u_2 (R_0 R_2 - \mu R_0 R_1 - R_0 R_1 - R_1 R_2) = \mu R_0 R_2 u_1,$$

т. е.

$$K = \frac{u_2}{u_1} = - \frac{R_0 R_2}{R_0 R_1 + R_0 R_1/\mu - R_0 R_2/\mu + R_1 R_2/\mu}.$$

При $\mu \rightarrow \infty$ $K = u_2/u_1 = -R_2/R_1$.

Вычислим входное сопротивление цепи. Согласно (20.2),

$$i_1 = \frac{u_1 - u_0}{R_1}; \quad R_{вх} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{R_1 u_1}{u_1 - u_0} = \frac{R_1 u_1}{u_1 - u_2/\mu}.$$

При $\mu \rightarrow \infty$ $R_{вх} = R_1$.

Таким образом, изменяя сопротивление обратной связи R_2 , можно изменять коэффициент передачи цепи K в широких пределах. В реальных устройствах выбирают $R_2 \approx R_1$. В этом случае $K \approx 1$, т. е. устройство, несмотря на наличие ОУ, может не обладать усиленными свойствами или обеспечивать небольшое усиление.

При анализе цепей с ОУ широкое распространение получили две схемы замещения: с разомкнутыми при $u_{вх} \approx 0$ (рис. 20.5) и с замкнутыми при $i_{вх} \approx 0$ (рис. 20.6) входными зажимами. Обе схемы практически равноценны, но в одних случаях удобнее оперировать со схемой, имеющей разомкнутые зажимы, а в других случаях — замкнутые. Из схемы рис. 20.6 видно, что $i_1 = u_1/R_1$; $i_2 = u_2/R_2$;

при $i_{\text{вх}} = 0$ $i_1 = i_2$ или $u_1/R_1 = u_2/R_2$, откуда $|K| = u_2/R_2 = = |u_1|/R_1$. Так как $u_1 \approx 0$, то $R_{\text{вх}} = R_1$. Полученные соотношения тем точнее, чем больше коэффициент усиления ОУ, включенного в цепь.

В ряде случаев необходимо иметь устройства, мгновенное напряжение на выходе которых пропорционально сумме мгновенных значений напряжения от нескольких источников. Подобные устройства, называемые сумматорами, удобно выполнить с помощью ОУ, например, по схеме рис. 20.7. При этом источники сигналов имеют общую корпусную точку, а так как сопротивления $R'_1, R''_1, R'''_1 \dots$ выбирают достаточно большими, то взаимное влияние источников друг на друга практически отсутствует.

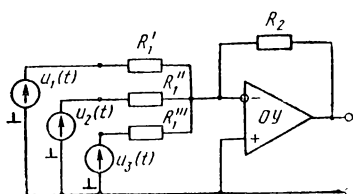


Рис. 20.7

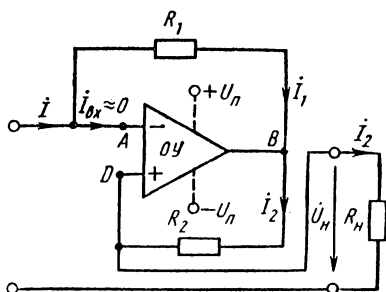


Рис. 20.8

Инвертирование сопротивлений. С помощью цепи, содержащей ОУ, можно инвертировать сопротивления, т. е. изменять знак сопротивлений на противоположный. Рассмотрим схему рис. 20.8. Так как

$i_{\text{вх}} \approx 0$, то $\dot{Z}_1 i_1 + \dot{Z}_2 i_2 = 0$, откуда $i_1 = -\frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1} i_2$. Как и во

всякой цепи, $\dot{Z}_{\text{вх}} = \dot{U}_1 / i_1$. Так как $\Delta U = 0$, то

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2; \quad \dot{Z}_{\text{вх}} = \dot{U}_2 / i_1 = \frac{\dot{U}_2}{\frac{\dot{Z}_2 i_2}{\dot{Z}_1}} = -\frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1} (\dot{U}_2 / i_2) = -(\dot{Z}_1 / \dot{Z}_2) \dot{Z}_{\text{н}}.$$

Если $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2$, то $\dot{Z}_{\text{вх}} = -\dot{Z}_{\text{н}}$. При $\dot{Z}_{\text{н}} = R$ $\dot{Z}_{\text{вх}} = -R$. Таким образом, если данную цепь нагрузить на резистор, сопротивление которого имеет чисто резистивный характер, то входное сопротивление цепи также будет иметь резистивный характер, но с отрицательным знаком. Рассмотренный четырехполюсник называют *конвертором отрицательных сопротивлений* (КОС). КОС можно использовать для изменения резистивных сопротивлений цепей. Например, если в схеме рис. 20.9 последовательно с резистором $R_{\text{н}}$ включить КОС, то входное сопротивление цепи уменьшится, а если параллельно (рис. 20.10), то — увеличится. Изменяя резистивное сопротивление цепи, можно изменять ее характеристики, например, повышать добротность, уменьшать влияние нагрузочных сопротивлений, переводить цепь из режима, при котором корни характеристического уравнения, описывающие свободные процессы в цепи, находятся в левой

полуплоскости, в режим, при котором корни этого уравнения переходят в правую полуплоскость (при этом в контуре возбуждаются колебания) и т. д. Если к выходу КОС подключить конденсатор, т. е. подсоединить цепь с отрицательным реактивным сопротивлением, то входное сопротивление конвертора будет иметь реактивный характер

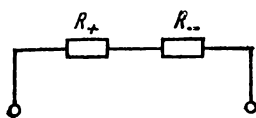


Рис. 20.9

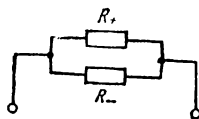


Рис. 20.10

и окажется положительным. При этом получают электронное устройство, обладающее индуктивным свойством. Если к такому устройству подключить конденсатор, то можно получить цепь с избирательными свойствами.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать напряжения на выходе схемы рис. 20.11, если $U_1 = 1$ В; $R_1 = 5$ кОм; $R_2 = 1-10$ кОм. Результаты расчетов занести в табл. 20.1.

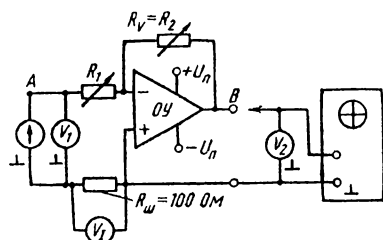


Рис. 20.11

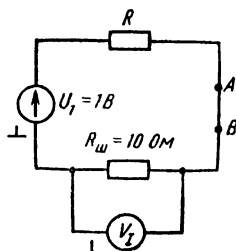


Рис. 20.12

2. Выбрать сопротивление R (рис. 20.12) и предел измерения вольтметра V_1 , при котором стрелка прибора V_1 отклоняется на 0,2—0,3 от номинального значения.

3. Определить резонансную частоту f_0 и добротность Q последовательного колебательного RLC -контра (рис. 20.13) при отключенном и подключенном резисторе $R_H = 5$ кОм.

Задание. Исследовать входные и передаточные свойства цепей с управляемыми источниками.

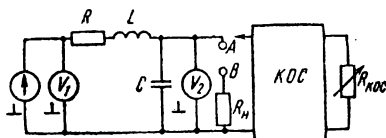


Рис. 20.13

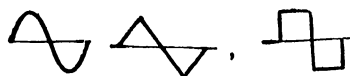
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 20.11. Подключить источники питания к ОУ. Входные зажимы вольтметра V_2 и осциллографа к точке B не подключать. Установить частоту генератора в пределах $0,5\text{—}5\text{ кГц}$; $U_1 = 1\text{ В}$. На магазине сопротивлений $R_V = R_2$ установить сопротивление $3\text{—}5\text{ кОм}$. Изменять сопротивление R_1 от 1 до 10 кОм, показания прибора V_1 занести в табл. 20.1. Установить $R_1 = 5\text{ кОм}$ и изменять сопротивление R_2 от 1 до 10 кОм. Убедиться, что изменение сопротивления R_2 не изменяет входное сопротивление, а следовательно, и показания прибора V_1 .

2. Закоротить резистор $R_{ш}$. Снять передаточные характеристики цепи. Входные выводы вольтметра V_2 и осциллографа подключить к точке A , срисовать с экрана осциллографа форму входного сигнала. На переменном резисторе R_2 установить сопротивление 1 кОм. Перенести входной вывод приборов из точки A в точку B . Записать показания вольтметра V_2 . Убедиться, что ОУ не вносит искажений и форма выходного напряжения идентична форме входного. Изменять сопротивление резистора R_2 от 1 до 10 кОм. Записать показание вольтметра V_2 , наблюдать на экране осциллографа форму выходного сигнала.

3. Собрать цепь по схеме рис. 20.7. В качестве сигналов $u_1(t)$, $u_2(t)$ и $u_3(t)$ использовать сигналы, подведен-

ные к точкам, обозначенным



или к точкам f_1 , $2f_1$, $3f_1$ генератора. Амплитуды и начальные фазы указанных сигналов можно изменять с помощью соответствующих регуляторов. Складывать можно два или три сигнала в любых сочетаниях. Подключить осциллограф к входным или выходным зажимам цепи, зарисовать получившиеся изображения.

4. Собрать цепь по схеме рис. 20.12. Измерить напряжение U_1 . Разомкнуть перемычку между точками A и B и подключить к этим точкам блок КОС, находящийся на панели активных элементов стенда. Изменить сопротивление резистора, включенного на вход КОС, записать показания прибора.

5. Собрать цепь по схеме рис. 20.13 при отключенном резисторе R_n . Изменяя частоту генератора, найти резонанс-

ную частоту f_0 . На вольтметре V_1 поддерживать напряжение 1 В. Записать показания приборов, определить добротность контура. Подключить резистор $R_n = R_V$, убедиться, что добротность падает из-за значительной мощности, рассеиваемой при этом на резисторе R_n .

6. Подключить КОС, находящийся на панели активных элементов стенда, параллельно резистору R_n (рис. 20.13). Изменяя сопротивление резистора $R_{КОС}$, наблюдать за показаниями вольтметра V_2 при неизменном входном напряжении U_1 . Записать показания приборов. Увеличение напряжения на V_2 свидетельствует об увеличении добротности цепи, т. е. росте эквивалентной нагрузки $R_{n эк}$. Поскольку R_n и $R_{КОС}$ соединены параллельно, $R_{n эк} = (R_n R_{КОС}) / (R_n + R_{КОС})$, откуда $R_{КОС} = (R_n R_{n эк}) / (R_n - R_{n эк})$. Так как $R_{n эк} > R_n$, то $R_{КОС}$ — величина отрицательная.

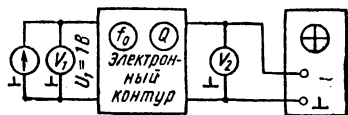


Рис. 20.14

7. Исследовать цепь при последовательном подключении КОС к колебательному контуру. Для этого собрать цепь по схеме рис. 20.14. Колебательный контур с регуляторами f_0 и Q находится на панели активных элементов. На генераторе установить напряжение 1 В, регулятор Q на контуре повернуть до отказа против часовой стрелки, т. е. в положение наименьшей добротности и, следовательно, наибольшего резистивного сопротивления цепи. Регулятором f_0 настроить контур в резонанс. Регуляторы на осциллографе установить в положения, при которых изображение синусоиды занимает не более двух клеток. Отключить генератор от входа цепи. Убедиться, что при отключенном источнике колебания на выходе цепи не возникают. Это означает, что при данном положении регулятора Q соотношения между параметрами элементов цепи такие, при которых корни характеристического уравнения, описывающего свободные колебания в цепи, находятся в левой полуплоскости.

8. Подключить генератор к входу цепи. Убедиться, что колебания на входе цепи имеют место. В небольших пределах изменять частоту генератора. При этом изображение на экране осциллографа должно изменяться в соответствии с изменением частоты генератора, т. е. колебания, имеющиеся на экране осциллографа, являются вынужденными, задаваемыми генератором. Установить частоту, при которой амплитуда выходного напряжения максимальна.

9. Медленно поворачивать регулятор Q по часовой стрелке. Поскольку при этом отрицательное сопротивление по абсолютному значению возрастает, а общее сопротивление потерь уменьшается, добротность контура начинает расти. Выходное напряжение увеличивается. При некотором положении регулятора Q выходное напряжение скачком резко увеличится. Это означает, что отрицательное сопротивление стало больше (по модулю) положительного, в контуре возникли незатухающие колебания, соотношения параметров цепи оказались такими, при которых корни характеристического уравнения, описывающего процессы в цепи, переместились в правую полуплоскость. Отключить источник от входных выводов контура. Убедиться, что колебания на входе контура остаются неизменными. Медленно поворачивать регулятор f_0 контура против часовой стрелки. Найти положение, при котором колебания срываются. Следовательно, при таких параметрах корни характеристического уравнения снова оказываются в левой полуплоскости. Поворачивать регулятор Q по часовой стрелке. Найти положение, при котором колебания возобновляются. Повернуть регулятор Q по часовой стрелке до отказа. Изменяя положение регулятора f_0 , наблюдать за изменением частоты свободных колебаний в контуре.

10. Повернуть регулятор Q против часовой стрелки до отказа. Убедиться, что ни при каком положении регулятора самовозбуждение в контуре не возникает.

Обработка результатов измерений

1. Сравнить экспериментальные данные, полученные в п. 1 и 2, с аналогичными, найденными при предварительном расчете.

2. Рассчитать входное сопротивление КОС по данным, полученным в п. 4—6.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Объясните назначение цепей обратной связи.
2. Начертите эквивалентные схемы цепей с ОУ.
3. Как рассчитать коэффициент передачи и входное сопротивление цепи с ОУ?
4. Начертите схему сумматора, объясните его назначение, приведите примеры использования сумматора.
5. Начертите схему КОС, докажите, что $R_{вх} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot R_n$.
6. Начертите схему, в которой можно повысить добротность с помощью КОС. Приведите примеры использования КОС.

7. Резисторы с положительным сопротивлением R_A и отрицательным сопротивлением R_B соединены параллельно. Рассчитайте и постройте кривые входного сопротивления цепи, если: а) $R_A = \text{const}$; $|R_B| = 0 \div \infty$; б) $R_B = \text{const}$; $R_A = 0 \div \infty$.

Лабораторная работа № 21

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ С УПРАВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ (РЕКОМЕНДУЕТСЯ В КАЧЕСТВЕ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ)

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочесть по учебнику [1] § 8.4 (раздел «Гиратор»); 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 21.1, 21.2; 4) ответить на вопросы для самопроверки.

Цель работы: изучить четырехполюсники, содержащие управляемые источники и обладающие избирательными свойствами.

Цепи с зависимыми источниками могут обладать разнообразными АЧХ, подобными, например, характеристикам узкополосных (селективных) полосовых фильтров, а также ФНЧ и ФВЧ.

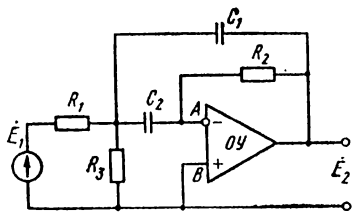


Рис. 21.1

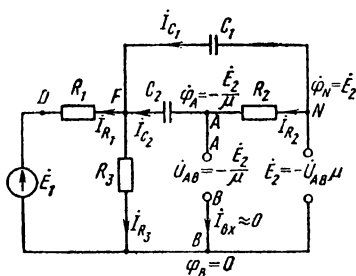


Рис. 21.2

Покажем на примере цепи, имитирующей колебательный контур (рис. 21.1), методику определения ее передаточной характеристики. Заменим исходную цепь схемой замещения. При этом резисторы и конденсаторы R_1, R_2, R_3, C_1, C_2 заменим сопротивлениями R_1, R_2, R_3 , емкостями C_1, C_2 ; ОУ представим в виде управляемого источника \dot{E}_2 и входной цепи (участка AB), у которой при нормальной работе ОУ напряжение и ток близки к нулю. Входную цепь на схеме замещения можно представить в виде: 1) короткозамкнутого участка с током, примерно равным нулю; 2) разомкнутого участка с напряжением на его зажимах также близким к нулю. Подобная замена справедлива только для управляемых источников с большим коэффициентом

ентом усиления, например для ОУ. Она не может быть осуществлена при анализе цепей, содержащих управляемые источники с ограниченным коэффициентом усиления, например транзисторов. Следует иметь в виду, что значение зависимой ЭДС не может превышать напряжения источника постоянного тока, питающего ОУ.

Таким образом, эквивалентная схема исследуемой цепи имеет вид, показанный на рис. 21.2. Рассчитать передаточную функцию цепи $K = \dot{E}_2 / \dot{E}_1$ можно различными способами, например методом узловых потенциалов. Примем потенциал точки B за нулевой. В этом случае потенциал точки D равен E_1 , а точки N — E_2 . Пусть входной ток ОУ близок к нулю; выходное напряжение \dot{U}_2 связано с входным напряжением \dot{U}_{AB} зависимостью $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 = -\mu \dot{U}_{AB}$ (знак минус указывает на то, что входное напряжение подается на инверсный вход ОУ, знак выходного напряжения при этом оказывается обратным знаку входного). Составим уравнения для узлов F и A :

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_F \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + j\omega C_1 + j\omega C_2 \right) - j\omega C_2 \dot{\varphi}_A &= \frac{\dot{E}_1}{R_1} + j\omega C_1 \dot{E}_2; \\ -j\omega C_2 \dot{\varphi}_F + \dot{\varphi}_A \left(\frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \right) &= \frac{\dot{E}_2}{R_2}. \end{aligned}$$

Так как $\dot{U}_{AB} = -\dot{E}_2/\mu$, то

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_F \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + j\omega C_1 + j\omega C_2 \right) + (j\omega C_2/\mu - j\omega C_1) \dot{E}_2 &= \dot{E}_1/R_1; \\ -j\omega C_2 \dot{\varphi}_F &= \left[1/R_2 + \frac{1}{\mu} (1/R_2 + j\omega C_2) \right] \dot{E}_2/R_1. \end{aligned}$$

При $\mu \rightarrow \infty$ данные выражения приобретают вид

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_F [1/R_1 + 1/R_3 + j\omega (C_1 + C_2)] - j\omega C_1 \dot{E}_2 &= \dot{E}_1/R_1; \\ -j\omega C_2 \dot{\varphi}_F &= \dot{E}_2/R_2, \end{aligned}$$

откуда

$$- \frac{\dot{E}_2}{j\omega R_2 C_2} [1/R_1 + 1/R_3 + j\omega (C_1 + C_2)] - j\omega C_1 \dot{E}_2 = \dot{E}_1/R_1.$$

Проделав элементарные преобразования, получим

$$K = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} = - \frac{j\omega \left(\frac{1}{R_1 C_1} \right)}{(j\omega)^2 + j\omega \left(\frac{C_1 + C_2}{R_2 C_1 C_2} \right) + \frac{(R_1 + R_3)}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}}.$$

Если $C_1 = C_2 = C$, то

$$K = - \frac{j\omega \left(\frac{1}{R_1 C} \right)}{-\omega^2 + j\omega \left(\frac{2}{R_2 C} \right) + \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3 C^2} \right)}. \quad (21.1)$$

Как известно, о свойствах цепей можно судить по расположению корней знаменателя приведенного выражения передаточной функции, т. е. полюсов функции $K(p)$ в плоскости комплексного переменного p . В частности, если знаменатель имеет структуру $-\omega^2 + j\omega B + D$, то множитель B представляет собой член ω_0/Q , а $D = \omega_0^2$, где ω_0 — резонансная частота; Q — добротность цепи. Проверим это положение на примере последовательного колебательного RLC -контура, у которого выходное напряжение снимается с резистора и, следовательно, пропорционально току (рис. 21.3):

$$\begin{aligned} K &= \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R}{R + j\omega L + 1/(j\omega C)} = \frac{j\omega RC}{-\omega^2 LC + j\omega RC + 1} = \\ &= \frac{j\omega \left(\frac{R}{L} \right)}{-\omega^2 + j\omega (R/L) + 1/(LC)}. \end{aligned} \quad (21.2)$$

Из полученного выражения следует, что $\omega_0^2 = 1/(LC)$, т. е. $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$; $j\omega \frac{R}{L} = j\omega \frac{\omega_0}{Q}$, откуда $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$, что полностью соответствует известным выражениям для резонансной частоты и добротности. Если снимать выходное напряжение с конденсатора, то

$$K = \frac{1/LC}{-\omega^2 + j\omega (R/L) + 1/LC}.$$

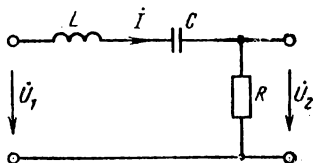


Рис. 21.3

Знаменатель данного выражения тот же, что (21.2). Следовательно, их передаточные АЧХ аналогичны. Отличия есть только в числителе и масштабе АЧХ. Характер передаточной функции остается неизменным, особенно при $Q \gg 1$. Сравнивая выражения (21.1) и (21.2), можно сделать следующие выводы.

Цепь, описанная выражением (21.1), имеет такие же передаточные характеристики, как и цепь рис. 21.3. Резонансная частота цепи с активными элементами.

$$\omega_0 = \frac{1}{C \sqrt{R_2 \left(\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \right)}}.$$

При $R_1 \gg R_3$ (что обычно имеет место в реальных цепях)

$$\omega_0 = \frac{1}{C \sqrt{R_2 R_3}}; f_0 = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_2 R_3}}.$$

Так как $\frac{2}{R_2 C} = \frac{\omega_0}{Q}$, то $Q = \frac{\omega_0 R_2 C}{2} = \frac{R_2 C}{2 C \sqrt{R_2 R_3}} = 0,5 \sqrt{\frac{R_2}{R_3}}$

Таким образом, уравнение (21.1) можно записать в виде

$$\underline{K} = \frac{-j\omega [1/(R_1 C)]}{-\omega^2 + j\omega (\omega_0/Q) + \omega_0^2},$$

причем знак минус в числителе указывает на инверсионные свойства управляемого источника. Модуль передаточной функции

$$K = \frac{\omega [1/(R_1 C)]}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\omega \frac{\omega_0}{Q}\right)^2}}. \quad (21.3)$$

При $\omega = 0$; и $\omega = \infty$ $K = 0$. На резонансной частоте

$$K_0 = K_{\max} = \frac{\omega Q}{\omega \omega_0 R_1 C} = \frac{\sqrt{R_2} C \sqrt{R_2} \sqrt{R_3}}{2 R_1 C \sqrt{R_3}} = 0,5 \frac{R_2}{R_1}.$$

Следовательно, цепь обладает избирательными свойствами, а передаточная АЧХ имеет вид резонансной кривой. Обратим внимание на то, что в рассматриваемой цепи добротность характеризует полосу пропускания и избирательные свойства цепи, а не отношение выходного напряжения к входному, как, например, в пассивном последовательном RLC -контуре. Абсолютная ширина полосы пропускания

$$\Pi = \frac{f_0}{Q} = \frac{2\sqrt{R_3}}{2\pi C \sqrt{R_2} R_3 \sqrt{R_3}} = \frac{1}{\pi R_2 C}, \text{ относительная ширина } S_0 = \Pi/f_0 = 1/Q = 2\sqrt{R_3/R_2}.$$

Как следует из приведенных выражений, избирательные свойства рассматриваемой цепи определяются параметрами элементов R_2, R_3, C .

Передаточная ФЧХ описывается выражением

$$\varphi_K = - \left[90^\circ - \arctg \frac{\omega \omega_0}{Q (\omega_0^2 - \omega^2)} \right].$$

Одним из важных достоинств исследуемого контура является высокое входное и малое выходное сопротивления, что выгодно отличает данный активный четырехполюсник от аналогичного пассивного. У пассивного последовательного колебательного контура входное сопротивление на резонансной частоте составляет десятки ом, а минимальное сопротивление нагрузки, при котором добротность падает незначительно, — десятки — сотни килоом. У активного контура входное сопротивление практически равно R_1 , т. е. на несколько порядков больше, чем у последовательного RLC -контура. Сопротивление нагрузки может быть значительно меньше, чем пассивного. Отсутствие индуктивных катушек позволяет изготавливать избирательные цепи с использованием микроэлектронных элементов, что делает их компактными, значительно расширяет области применения подобных устройств.

Аналогичным образом можно собрать цепи, обладающие избирательными свойствами. На рис. 21.4 показана схема активного ФНЧ, передаточная функция которой

$$\underline{H} = \frac{A\omega_0^2}{-\omega^2 + j\omega (\omega_0/Q) + \omega_0^2},$$

где ω_0 — частота среза; A — постоянная величина, зависящая от параметров цепи. На рис. 21.5 показана схема ФВЧ, передаточная функция которой $H = \frac{A}{D\omega^2}$.

В фильтрах следует выбирать $Q = 1 \div 2$. При конструировании избирательных систем можно использовать цепи с КОС, например ФНЧ (рис. 21.6) для которого

$$H = \frac{[1/(RC)]^2}{-\omega^2 + j\omega [1/(RC)] + [1/(RC)]^2}.$$

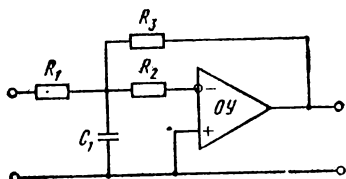


Рис. 21.4

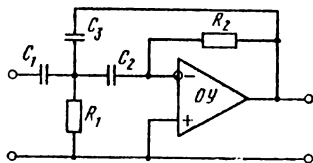


Рис. 21.5

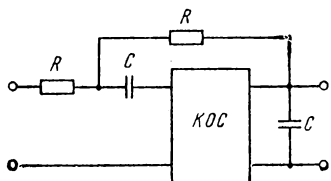


Рис. 21.6

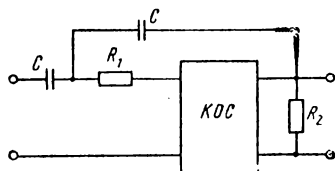


Рис. 21.7

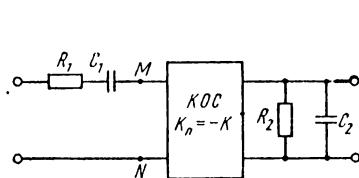


Рис. 21.8

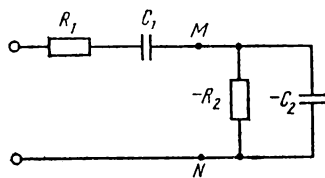


Рис. 21.9

ФНЧ (рис. 21.7) имеет передаточную характеристику

$$H = \frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\omega [1/(R_2 C)] + [1/(R_1 R_2 C^2)]}.$$

Определим передаточную функцию селективного фильтра (рис. 21.8). Заменим схему рис. 21.8 схемой замещения (рис. 21.9). Входное сопротивление КОС, нагруженного на элементы R_2 и C_2 , соединенные последовательно, есть сопротивление этих элементов,

взятое с обратным знаком и умноженное на коэффициент передачи КОС:

$$\underline{Z}_{MN} = K \left[\frac{R_2 (1/(j\omega C_2))}{R_2 + [1/(j\omega C_2)]} \right] = - \frac{KR_2}{1 + j\omega R_2 C_2};$$

$$\underline{H} = \frac{- \frac{KR_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} - \frac{KR_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} =$$

$$= \frac{j\omega K [1/(R_1 C_2)]}{-\omega^2 + j\omega \left(\frac{R_1 C_1 + R_2 C_2 - KR_2 C_1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}.$$

При $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$

$$\underline{H} = \frac{j\omega [K/(RC)]}{-\omega^2 + j\omega [(2-K)/(RC)] + [1/(R^2 C^2)]}.$$

Если в КОС установлены одинаковые сопротивления (подробнее см. работу № 20), то коэффициент передачи $K = -1$. В этом случае

$$\underline{H} = \frac{j\omega [1/(RC)]}{-\omega^2 + j\omega [1/(RC)] + [1/(RC)^2]}.$$

Очевидно, что в такой цепи $Q = 1$.

Расчеты фильтров часто производят для нормированных значений. При этом $\omega_0 = 1$. В общем случае выражения для передаточных функций имеют вид:

для ФНЧ

$$\underline{H} = \frac{A}{-\omega^2 + j\omega (1/Q) + 1};$$

для ФВЧ

$$\underline{H} = \frac{-D\omega^2}{-\omega^2 + j\omega (1/Q) + 1},$$

для селективного фильтра

$$\underline{H} = \frac{j\omega P}{-\omega^2 + j\omega (1/Q) + 1},$$

где A , D , P — постоянные величины, зависящие от параметров цепей. При расчетах по приведенным формулам сопротивления выражают в омах, индуктивности — в генри, емкости — в фарадах. Для определения параметров элементов фильтра с заданной частотой среза все сопротивления и индуктивности увеличивают, а емкости уменьшают в $\omega = 2\pi f$ раз, где f — частота среза (в ФНЧ и ФВЧ) или резонансная частота (в селективном фильтре).

Избирательные контуры можно получать также с помощью гириатора. *Гиратором* называют цепь с двумя источниками тока, управляемыми напряжениями (ИТУН) (рис. 21.10), для которых $i_1 = -g_2 \dot{U}_2$; $i_2 = g_1 \dot{U}_1$, где \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , i_1 , i_2 — напряжения и токи

на входе и выходе цепи; g_1, g_2 — проводимости гиратора. Входное сопротивление гиратора $Z_{вх} = Z_1 = \dot{U}_1/\dot{I}_1 = -\dot{I}_2/(g_1 g_2 \dot{U}_2) = 1/(g_1 g_2 Z_2)$. Если сопротивления цепи одинаковые ($Z_1 = Z_2 = R$), а нагрузка имеет емкостный характер ($Z_n = 1/(j\omega C)$), то $Z_{вх} = \frac{R^2}{1/(j\omega C)} = j\omega R^2 C$, т. е. входное сопротивление цепи имеет чисто индуктивный характер, причем $L_{эк} = R^2 C$. Полная схема гиратора

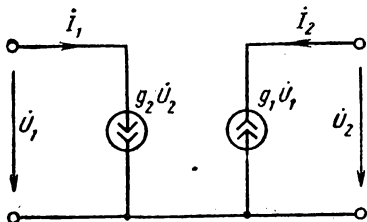


Рис. 21.10

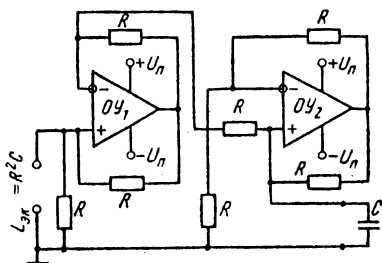


Рис. 21.11

показана на рис. 21.11. Если к данной цепи подключить внешний конденсатор, то получившаяся цепь будет обладать избирательными свойствами.

Задание. Исследовать передаточные свойства избирательных цепей, содержащих управляемые источники.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 21.12. Исследуемый активный четырехполюсник представляет собой селективный фильтр, схема которого изображена на рис. 21.1. На переднюю панель блока выведены регуляторы, изменяющие сопротивления R_2 и R_3 , обозначенные Q и f_0 .

2. Установить регуляторы R_2 и R_3 в положение максимального сопротивления. На вольтметре V_1 установить напряжение 2В, вольтметр V_2 перевести на предел 1 В, магазин сопротивлений $R_V = R_n$ отключить. Изменяя частоту генератора, найти резонансную частоту по максимуму показания прибора V_2 . Выходное напряжение будет менее 1 В. Отрегулировать напряжение U_1 таким образом, чтобы напряжение U_2 составляло 1 В. Изменить частоту так, чтобы вольтметр V_2 показал 0,7 В. Получившаяся частота будет граничной $f_{гр}$. Сопротивление регулятора R_3 , резонансную f_0 и граничную $f_{гр}$ частоты для нескольких положений регулятора Q , напряжения U_1 и U_2 данного и последующих экспериментов занести в табл. 21.1.

3. Регулятор R_3 перевести в положение минимального сопротивления. При этом частота становится максимальной. Определить частоты f_0 и $f_{гр}$, напряжения U_1 и U_2 .

4. Установить частоту f в соответствии с вариантом задания (например, 5 кГц). Изменяя сопротивление резистора R_3 , настроить контур в резонанс. На вольтметре V_1 установить такое напряжение, при котором $U_{20} = 1$ В, снять АЧХ цепи. Установить резонансную частоту f_0 и $R_V = 5$ кОм. Подключить магазин сопротивлений к выходным

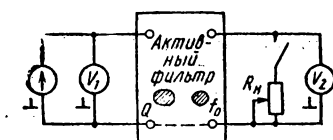


Рис. 21.12

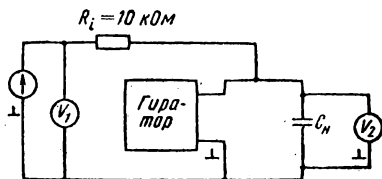


Рис. 21.13

зажимам контура; регулируя его переключатели, найти сопротивление, при котором выходное напряжение уменьшается примерно на 10 %. Записать показания приборов. Отключить от цепи R_V . Прodelать те же эксперименты при ином положении регулятора Q .

5. Собрать избирательный контур с гиратором (рис. 21.13), подключить источник питания. На вольтметре V_1 установить напряжение 5 В. Экспериментально определить резонансную f_0 и граничную $f_{гр}$ частоты, снять АЧХ цепи. Результаты измерений занести в табл. 21.2.

6. Вместо селективного фильтра подключить ФНЧ. Снять АЧХ цепи в диапазоне от $0,2 f_{ср}$ до $2 f_{ср}$. Аналогично снять АЧХ для ФВЧ. Таблицу для записи результатов измерений составить самостоятельно.

Таблица 21.1

Получено при эксперименте						Рассчитано по экспериментальным данным при C
Положение регулятора f_0	Положение регулятора Q	f_0 , кГц	$f_{гр}$, кГц	U_1 , В	U_2 , В	
						$R_1 =$; $R_2 \max =$; $R_3 \min =$; $R_3 \max =$; $L_{эк \min} =$; $L_{эк \max} =$

Таблица 21.2

$U_1 =$; $R_i = 10 \text{ кОм}$; $R_{\text{гир}} = 1 \text{ кОм}$							
Получено при эксперименте		Рассчитано по экспериментальным данным					
f , Гц	U_2 , В.	$L_{\text{ЭК}}$, Гн	$C_{\text{гир}}$, мкФ	$f_{\text{ГР}}$, Гц	Π , Гц	$Q_{\text{ЭК}}$	$R_{\text{ЭК.потерь}}$, Ом

Обработка результатов измерений

1. Зная f_0 , U_1 , U_{20} , рассчитать $R_{\text{зmax}}$, $R_{\text{зmin}}$, R_1 , R_2 . Значение C берут по варианту стенда (например, $C = 3,8 \text{ нФ}$). Результаты расчетов занести в табл. 21.1.

2. Определить добротности и эквивалентные «электронные индуктивности» для произведенных экспериментов.

3. Зная R_2 , R_3 и C , рассчитать АЧХ цепи, показанной на рис. 21.1 и 21.2, сравнить с характеристиками, полученными экспериментально. Таблицу для записи результатов составить самостоятельно.

4. Зная емкость C и резонансную частоту f_0 , вычислить эквивалентную входную индуктивность $L_{\text{ЭК}}$, емкость конденсатора $C_{\text{гир}}$ гиратора, ширину полосы пропускания Π , добротность $Q_{\text{ЭК}}$, сопротивление потерь $R_{\text{ЭК.потерь}}$ «гираторного контура» (табл. 21.2).

5. По экспериментальным данным построить АЧХ для ФНЧ и ФВЧ. Таблицу для записи результатов составить самостоятельно.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1*. Выведите выражение для передаточной функции.

2. Почему полином знаменателя передаточной функции записывают в приведенном виде?

3. Каков физический смысл коэффициентов B и D , если полином знаменателя имеет вид $-\omega^2 + j\omega B + D$?

4. Как изменится резонансная частота ω_0 и добротность Q , если сопротивление R_2 : а) увеличить в 2 раза; б) увеличить в 10 раз; в) уменьшить в 2 раза; г) уменьшить в 10 раз?

5. Какие элементы следует регулировать, чтобы при изменении резонансной частоты добротность контура оставалась неизменной?

6. Докажите, что при $\omega = 0$, $\omega = \infty$ $H = 0$, а при $\omega = \omega_0$ $H = R_2/(2 R_1)$.

7. Рассчитайте абсолютную и относительную ширину полосы пропускания.

8. Постройте передаточную ФЧХ.

* Вопросы 1—10 относятся к схеме рис. 21.1.

9. Как определить входное сопротивление цепи?
10. Вычислить R_2 , R_3 , C если $R_1 = 100 \text{ кОм}$; $f_0 = 5 \text{ кГц}$; $Q = 10$; $H_0 = 0,1$.
11. Начертите схемы активных ФНЧ. Подберите параметры цепи и рассчитайте ее АЧХ и ФЧХ.
12. Что такое гиратор?
13. Определите $L_{\text{ЭК}}$ гиратора, если $R = 10 \text{ кОм}$; $C = 1 \text{ мкФ}$.

Лабораторная работа № 22

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИХ И ИНТЕГРИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 8.4; 2) изучить описание данной работы; 3) вырезать 6 калек по диаметру экрана осциллографа; 4) выполнить предварительные расчеты; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

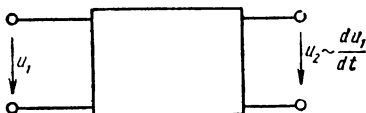


Рис. 22.1

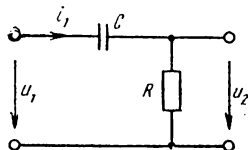


Рис. 22.2

Цель работы: экспериментально определить форму сигналов на выходе дифференцирующих цепей при различных соотношениях постоянной времени цепи и длительности сигнала.

Дифференцирующие цепи. Дифференцирующими называются четырехполюсники (рис. 22.1), напряжение на выходе которых пропорционально производной по времени от напряжения на входе, т.е. четырехполюсники, в которых выполняется условие $u_2(t) \propto \frac{d}{dt} [u_1(t)]$.

В качестве дифференцирующего элемента удобно использовать конденсатор, поскольку мгновенные значения напряжения и ток в нем связаны соотношением $i = C \frac{du_C}{dt}$. Следовательно, если собрать цепь, в которой выходное напряжение $u_2(t)$ пропорционально току $i(t)$, текущему через конденсатор, то такая цепь будет дифференцирующей. Чтобы выходное напряжение было пропорционально току, его следует снимать с резистора, включенного последовательно с конденсатором (рис. 22.2). В этом случае форма выходного напряжения повторяет форму тока в цепи. Однако наличие резистора в цепи

нарушает соотношение $u_2(t) \propto \frac{d}{dt} [u_1(t)]$, поскольку в этом случае напряжение на конденсаторе (с которым и связан через производную ток) отличается от входного напряжения u_1 на значение выходного напряжения u_2 . Ток в цепи оказывается пропорциональным производной по времени не от входного напряжения, а от разности между входным и выходным напряжениями. Чем больше сопротивление R , а следовательно и выходное напряжение u_2 , тем больше форма выходного напряжения отличается от производной по времени входного

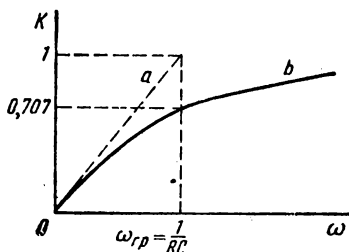


Рис. 22.3

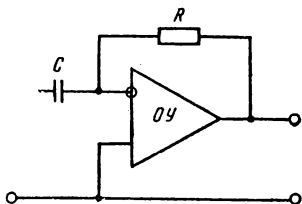


Рис. 22.4

напряжения. Очевидно, что цепь рис. 22.2 близка к дифференцирующей при $u_2(t) \ll u_1(t)$, поскольку только в этом случае $u_C(t) \approx \approx u_1(t)$. Так как в данной цепи $i = C \frac{du_C}{dt}$, то

$$u_2(t) = Ri = RC \frac{du_C}{dt} \approx RC \frac{du_1}{dt} = \tau \frac{du_1}{dt}.$$

Таким образом, дифференцирующей является цепь вида рис. 22.2 с малым коэффициентом передачи. Теоретически такая цепь работает как дифференцирующая только при коэффициенте передачи, равном нулю. По мере увеличения сопротивления R коэффициент передачи возрастает, а форма выходного напряжения $u_2(t)$ все больше становится отличной от du_1/dt , все более приближаясь к форме входного сигнала $u_1(t)$. При $u_2(t) \approx u_1(t)$ цепь из дифференцирующей превращается в переходную. Дифференцирующими являются RC -цепи, для которых $K \ll 1$ или $R \ll X_C$, или $\tau \ll T$, где τ — постоянная времени цепи, T — период (для периодических) или длительность (для непериодических) сигналов и т. д. Несмотря на то что получить идеальное дифференцирование не представляется возможным, дифференцирующие цепи, собранные на пассивных RC -элементах, широко используют на практике. Подобные цепи применяют, как правило, для получения узких коротких импульсов с крутыми фронтами, а не для математического дифференцирования. В ряде случаев при выполнении условия приближенного дифференцирования на выходе цепи получают сигналы, форма которых удовлетворяет поставленным требованиям. Иногда для получения большего коэффициента передачи цепи и соответственно большего выходного напряжения, можно допустить ухудшение формы сигнала. Определить условие, при котором четырехполосник является диффе-

ренцирующим, можно и на основании следующего. Поскольку операция дифференцирования по времени в комплексной форме соответствует умножению на $j\omega$, дифференцирующим будет любой четырехполюсник, для которого выполняется условие $U_2 \propto j\omega U_1$, т. е. передаточная функция пропорциональна частоте. Передаточная АЧХ идеального дифференцирующего четырехполюсника представляет собой прямую, проходящую через начало координат (прямая на рис. 22.3). Комплексная передаточная функция схемы рис. 22.2

$$\underline{K} = \frac{R}{1 + 1/(j\omega C)} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}, \text{ передаточная АЧХ } K = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

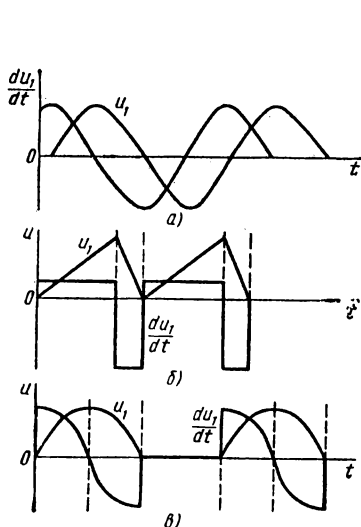


Рис. 22.5

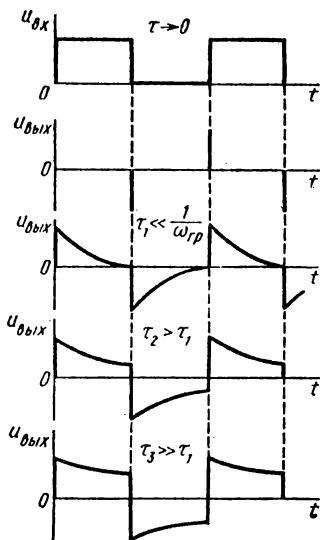


Рис. 22.6

Из приведенных соотношений следует, что практически $K \propto \omega$ при $R \ll \frac{1}{\omega C}$ или, что одно и то же, при $\omega \ll \frac{1}{RC} = \frac{1}{\tau}$. АЧХ цепи рис. 22.2 показана на рис. 22.3, б. Предельной частотой, при которой цепь еще можно принимать за примерно дифференцирующую, часто считают частоту $\omega_{rp} = 1/(RC)$. Несмотря на широкое распространение пассивных дифференцирующих RC -цепей, их недостатки, прежде всего малый коэффициент передачи, в особенности, когда необходимо получить импульсы с крутыми фронтами, являются серьезным препятствием для использования таких цепей во многих радиотехнических и электронных устройствах. Лучшие результаты можно получить с помощью дифференцирующих четырехполюсников, содержащих ОУ. Как показано в работе № 20, в цепях вида рис. 20.2 коэффициент передачи $K = \underline{Z}_2/\underline{Z}_1$, где \underline{Z}_2 — сопротивление цепи обратной связи, \underline{Z}_1 — входное сопротивление цепи с ОУ. Для схе-

мы рис. 22.4 $K = \frac{R}{1/(j\omega C)} = j\omega RC$, следовательно, данная цепь является дифференцирующей. Дифференцирующая цепь, собранная на активных элементах, совершеннее аналогической пассивной RC -цепи, поскольку ее коэффициент передачи значительно выше, а частотный диапазон — шире.

Для определения формы сигнала на выходе дифференцирующей цепи необходимо построить кривую, соответствующую производной по времени от входного сигнала. Напомним, что производная пред-

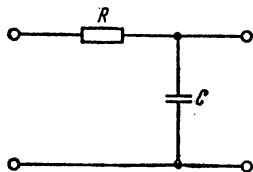


Рис. 22.7

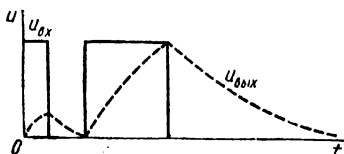


Рис. 22.8

ставляет собой величину, пропорциональную тангенсу угла наклона между касательной, проведенной в данной точке, и осью времени. Следовательно, для построения кривой выходного напряжения следует в ряде точек кривой входного напряжения провести касательные и построить кривые, мгновенные значения которых пропорциональны тангенсу угла наклона. Примеры кривых показаны на рис. 22.5, а — в. Если напряжение на входе дифференцирующей цепи нарастает скачкообразно, то ток i_C , а следовательно, и выходное напряжение u_R нарастают также скачкообразно. Но при скачкообразном уменьшении выходного напряжения конденсатор разряжается по экспоненциальному закону, причем чем больше постоянная времени цепи, тем медленнее он разряжается и больше кривая $u_2(t)$ отличается от кривой du_1/dt . Если на вход дифференцирующей цепи подведено напряжение П-образной формы, то на выходе получают сигналы, форма которых показана на рис. 22.6.

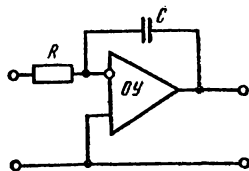


Рис. 22.9

Интегрирующие цепи. Интегрирующими являются четырех- полюсники, для которых выполняется условие $u_2(t) \propto \int u_1(t) dt$. Интегрирующие цепи могут быть собраны только из пассивных элементов либо могут включать ОУ. Схема простейшей интегрирующей RC -цепи показана на рис. 22.7. В такой цепи $u_2(t) = \frac{1}{C} \int i dt$.

Если $u_2 \ll u_1$, то

$$\begin{aligned} i &= u_R/R \approx u_1/R; \quad u_2 = \frac{1}{C} \int \frac{1}{R} u_1(t) dt = \frac{1}{RC} \int i_1(t) dt = \\ &= \frac{1}{\tau} \int u_1(t) dt. \end{aligned}$$

В пассивных интегрирующих цепях $u_{\text{вых}} \ll u_{\text{вх}}$; $K \ll 1$; $\tau \gg T$. Интегрирующие цепи используют для получения на выходе сиг-

налов, длительность которых больше, чем у входных, а крутизна фронтов меньше. Такие цепи выполняют разнообразные функции, например, позволяют уменьшить воздействие импульсных помех, преобразуют сигналы, отличающиеся по длительности в сигналы, различные по амплитуде (рис. 22.8), и т. д. При воздействии короткого импульса конденсатор не успевает зарядиться, а при воздействии длительного — успевает, за счет чего возникает разница в напряжениях на выходе цепи. Интегрирующая цепь с ОУ представлена на рис. 22.9. В такой цепи $K = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{1}{j\omega RC} \approx \frac{1}{j\omega}$.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Определить частоту f , при которой период сигнала равен T (значение T определяется вариантом задания, например $T=500$ мкс).

2. Рассчитать R для схемы рис. 22.1, которое в 50—100 раз меньше $T/(2\pi C)$, где C — емкость, значение которой

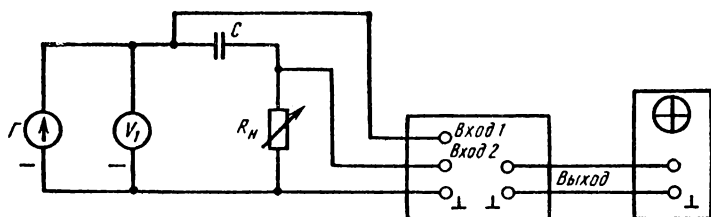


Рис. 22.10

выбирают согласно варианту задания (например, $C = 50$ нФ). Сравнить постоянную времени цепи τ с периодом входного сигнала T .

3. Зарисовать примерную форму напряжения на выходе схемы рис. 22.1 при выбранных R и C , если входное напряжение: а) синусоидальное; б) однополупериодное; в) П-образное.

Задание. Экспериментально получить кривые выходного напряжения при различных формах входного напряжения для цепей с $\tau \ll T$, $\tau = T$ и $\tau \gg T$.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 22.10. Установить выходное напряжение генератора равным 3—5 В, частоту — в соответствии с результатами предварительного расчета, R и C — согласно п. 2 предварительного расчета. На электронном коммутаторе регуляторы усиления вертикального

канала установить в позиции, при которых изображения входного и выходного напряжений занимают одинаковое число клеток (например, 6 кл.), а регуляторы усиления горизонтального канала — в положения, при которых цена деления клетки составляет величину, удобную для отсчета, например 50—100 мкс.

Сравнить постоянную времени цепи τ с периодом входного сигнала T . Если окажется, что $\tau \ll T$ при входном напряжении синусоидальной формы, выходное будет иметь косинусоидальную форму. С помощью регулятора «Совмещение» на электронном коммутаторе переместить горизонтальные оси, чтобы изображения наложались друг на друга. Убедиться, что сигнал, снимаемый с выходных зажимов цепи, определяет производную по времени от входного напряжения. Зарисовать получившиеся изображения.

2. Увеличивать сопротивление резистора R до $R \approx \approx T/(2\pi C)$. При этом коэффициент передачи увеличивается, а качество дифференцирования ухудшается. Изменить положение регулятора усиления второго канала электронного коммутатора так, чтобы выходное напряжение оставалось неизменным. Зарисовать получившееся изображение.

3. Увеличить сопротивление R в 50—100 раз, поддерживать выходное напряжение неизменным. Убедиться, что выходное и входное напряжения имеют одну и ту же форму, т. е. цепь превратилась из дифференцирующей в переходную. Зарисовать получившиеся изображения.

4. Переключатель Π_{ϕ} перевести в позицию



Установить R , полученное в п. 1 предварительного расчета. Выполнить эксперименты, аналогичные произведенным в п. 1—3. Наблюдать за изменением формы выходного напряжения. Зарисовать получившиеся изображения.

5. Прodelать аналогичные эксперименты при П-образном входном напряжении.

6. Заменить дифференцирующую RC -цепь дифференцирующей цепью с ОУ. Подавать на вход цепи сигналы



и П-образной формы, изменять сопро-

тивление обратной связи R_2 в 5—10 раз. Убедиться, что при увеличении коэффициента передачи форма выходного

напряжения остается практически неизменной и близкой к форме кривой с соответствующей производной по времени от входного напряжения.

7. Вместо дифференцирующей включить интегрирующую RC -цепь. Подвести к входу цепи напряжение П-образной формы. Выбрать параметры цепи, при которых $\tau \ll T$. Изменять сопротивление R до значения, при котором $\tau \gg T$. Зарисовать получающиеся изображения.

8. Изменить длительность импульсов сигналов П-образной формы, определить форму и амплитуду выходного напряжения в зависимости от длительности импульсов входного напряжения.

Обработка результатов измерений

Сравните формы и длительности сигналов на входе и выходе дифференцирующей и интегрирующей цепей (длительности сигналов отсчитывают на уровне 0,5 от максимального значения).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие четырехполюсники называют дифференцирующими?
2. Докажите, что если в цепи рис. 22.2 $R \ll X_C$, то четырехполюсник является практически дифференцирующим. В каком случае дифференцирование стало бы идеальным? Можно ли осуществить идеальное дифференцирование в пассивной цепи?

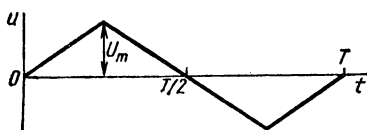


Рис. 22.11

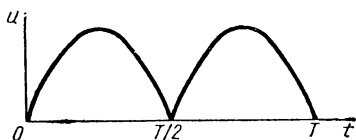


Рис. 22.12

3. Какую схему должна иметь RL -цепь и какие соотношения должны иметь место в ней, чтобы такая цепь была дифференцирующей?
4. Какие вы знаете критерии для получения практически дифференцирующей цепи?
5. Начертите схему дифференцирующей цепи с ОУ. Докажите, что в такой цепи $u_2(t) \propto \frac{d}{dt} [u_1(t)]$.
6. Нарисуйте кривые выходного напряжения, если цепь практически дифференцирующая, а входные сигналы периодические и имеют формы, показанные на рис. 22.11, 22.12.
7. Ответьте на вопросы 1—5 применительно к интегрирующим цепям.
8. Каким образом сигналы, отличающиеся по длительности, преобразовываются в сигналы, отличающиеся по амплитуде? Какие ограничения имеет данный способ преобразования?

Лабораторная работа № 23

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо: 1) прочесть по учебнику [1] § 10.2; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 23.1; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментально исследовать распределение напряжений вдоль однородной длинной линии при различных значениях сопротивлений нагрузки.

Линии передачи энергии, геометрическая длина l которых много меньше длины волны λ , могут быть представлены схемами замещения с сосредоточенными параметрами, а линии, геометрическая длина l которых соизмерима с длиной волны λ , — эквивалентными схемами с распределенными параметрами. Такие линии называют *длинными*. На практике длинными считают линии, у которых $l \geq (0,05 \div 0,1) \lambda$. В общем случае каждый элементарный отрезок линии имеет индуктивность L_1 , емкость C_1 , сопротивление потерь R_1 и проводимость потерь G_1 (рис. 23.1, а). Параметры L_1 , C_1 , R_1 , G_1 называют *погонными*. Если выполняются условия $\omega L_1 \gg R_1$; $\omega C_1 \gg G_1$ (что имеет место на высоких частотах), то такую линию считают линией без потерь (рис. 23.1, б).

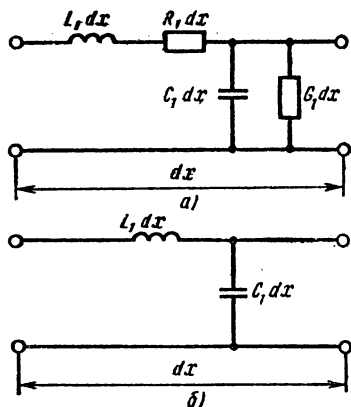


Рис. 23.1

Обычно в реальной двухпроводной или кабельной линии индуктивность и емкость равномерно распределяются вдоль линии. Электромагнитная волна распространяется вдоль линии с конечной скоростью $v = 1/\sqrt{L_1 C_1}$. Следовательно, отклики в различных точках длинной линии появляются не в момент подключения генератора к цепи, а несколько позже, причем время запаздывания τ зависит от длины линии и скорости распространения волны: $\tau = l/v = l\sqrt{L_1 C_1}$. Линия без потерь является идеальной линией задержки. На практике геометрическая длина линий, необходимая для получения времени задержки всего в единицы микросекунд, оказывается чрезвычайно большой. Например, у кабелей распространенных типов длиной 200 м время задержки составляет порядка единиц микросекунд. Поэтому в реальных устройствах используют искусственные длинные линии, представляющие собой большое число каскадно включенных звеньев с сосредоточенными параметрами. Чем больше звеньев

имеет искусственная линия, тем более схожи процессы, происходящие в ней, с процессами, получающимися в цепи с распределенными параметрами. Определим, какую частоту f должен иметь генератор, подключенный к искусственной линии, состоящей из n звеньев, чтобы эквивалентная длина такой линии была равна длине волны генератора.

Время задержки искусственной линии $\tau_3 = n\sqrt{L_{3в}C_{3в}}$, где $L_{3в}$, $C_{3в}$ — индуктивность и емкость каждого звена искусственной линии. Таким образом, искусственная линия, состоящая из n звеньев, эквивалентна двухпроводной линии с погонными индуктивностью $L_1 = L_{3в}$ и емкостью $C_1 = C_{3в}$ такой длины, при которой получается такое же время задержки τ_3 , как у искусственной линии. Частота f и период колебаний связаны соотношением $f = 1/T$. Если время задержки τ_3 линии равно периоду колебаний T , то расстояние, проходимое сигналом за это время, равно длине волны λ . Следовательно, $f = \frac{1}{n\sqrt{L_{3в}C_{3в}}}$. В свободном пространстве $\lambda = c/f$,

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света. При $f = \frac{1}{n\sqrt{L_{3в}C_{3в}}} l_{3к} = \lambda$,

откуда $l_{3к} = c/f = cn\sqrt{L_{3в}C_{3в}}$. Таким образом, искусственная линия, состоящая из n звеньев, имеющая индуктивность $L_{3в}$ и емкость $C_{3в}$ в каждом звене, на частоте $f = \frac{1}{n\sqrt{L_{3в}C_{3в}}}$ эквивалентна линии длиной λ , а на частоте, в четыре раза меньшей, — линии длиной $\lambda/4$.

Каждая линия характеризуется волновым сопротивлением $\underline{Z}_в$ и постоянной распространения $\underline{\gamma}$.

В общем случае волновое сопротивление линии $\underline{Z}_в = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}}$. В линиях без потерь волновое сопротивление имеет чисто резистивный характер; $Z_в = \sqrt{L_1/C_1}$. Коэффициент распространения $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)}$. В линии без потерь $\underline{\gamma}$ имеет чисто резистивный характер: $\underline{\gamma} = j\omega\sqrt{L_1C_1} = j\beta$. Вещественная часть постоянной распространения характеризует затухание колебаний в линии, а мнимая — изменение фазы колебаний вдоль линии. Во всех случаях, когда линия нагружена на резистор, сопротивление которого отличается от волнового, в линии имеет место отраженная волна, причем коэффициент отражения от нагрузки $\underline{\rho} = \frac{\underline{Z}_н - \underline{Z}_в}{\underline{Z}_н + \underline{Z}_в} = \rho e^{j\psi_\rho}$, где $\underline{Z}_н$ — сопротивление нагрузки.

В зависимости от значений сопротивления нагрузки $\underline{Z}_н$, на которое нагружена линия, могут иметь место следующие режимы работы линии: а) режим холостого хода (линия разомкнута на конце; $Z_н = \infty$); б) режим короткого замыкания (линия замкнута на конце; $Z_н = 0$); в) режим работы на согласованную нагрузку (линия нагружена на резистор, сопротивление которого равно волновому $\underline{Z}_н = \underline{Z}_в$); г) режим работы на несогласованную нагрузку (линия нагружена на резистор, сопротивление которого не равно волновому;

$Z_H \neq Z_B$; д) режим работы при замыкании линии на элементы с чисто реактивным сопротивлением ($Z_H = \pm jX$) *.

В общем случае комплексные действующие значения напряжения и токов в любой точке линии определяют из выражений

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \dot{I}_2 Z_B \operatorname{sh} \gamma l; \quad (23.1)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l, \quad (23.2)$$

где \dot{U} , \dot{I} — комплексные действующие значения напряжения и тока на расстоянии l от конца линии (рис. 23.2); \dot{U}_2 , \dot{I}_2 — комплексные действующие значения напряжения и токов в конце линии, т. е. на нагрузке. Для линии без потерь выражения (23.1) и (23.2) принимают вид

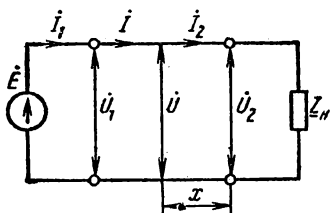


Рис. 23.2

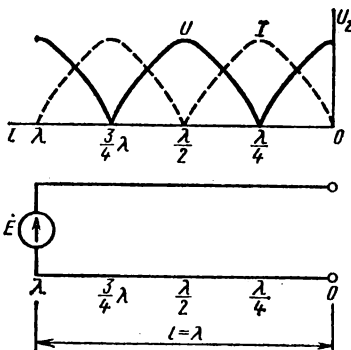


Рис. 23.3

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos 2\pi (l/\lambda) + j\dot{I}_2 Z_B \sin 2\pi (l/\lambda); \quad (23.3)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 \cos 2\pi (l/\lambda) + j \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \sin 2\pi (l/\lambda). \quad (23.4)$$

При работе в режиме холостого хода ($\dot{I}_2 = 0$)

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos 2\pi (l/\lambda); \quad \dot{I} = j \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \sin 2\pi (l/\lambda).$$

Модули напряжения и тока $U = U_2 \cos 2\pi (l/\lambda)$; $I = \frac{U_2}{Z_B} \sin 2\pi (l/\lambda)$.

При $l = 0$ $U = U_2$; при $l = \lambda/4$ $U = 0$, $I = U_2/Z_B$; при $l = \lambda/2$ $U = U_2$, $I = 0$ и т. д.

Распределения напряжений и токов в разомкнутой линии длиной l показаны на рис. 23.3. Обратим внимание на то, что на рисунке дано распределение действующих (амплитудных) значений токов и напряжений, а не мгновенных. При холостом ходе $\rho = 1$, т. е. амплитуды падающей и отраженной волн равны между собой. В точках, где падающая и отраженная волны совпадают по фазе, получаются пучности, а в точках, где они противоположны по фазе, — узлы. Волны,

* Все остальные режимы являются частными случаями несогласованного режима.

образующие распределение напряжений и токов с узлами и пучностями, называют *стоячими*. В режиме стоячих волн амплитудное значение напряжения в каждой точке линии различно и зависит от расстояния до конца линии. Режим стоячих волн имеет место также при коротком замыкании на выходе линии ($U_2 = 0$):

$$\dot{U} = j\dot{I}_2 Z_B \cos 2\pi (l/\lambda); \quad \rho = -1; \quad \dot{I} = \dot{I}_2 \cos 2\pi (l/\lambda).$$

Распределения токов и напряжений $U = f(l)$, $I = f(l)$ в короткозамкнутой линии показаны на рис. 23.4. Если линия замкнута на резистор сопротивлением, равным волновому, то коэффициент отра-

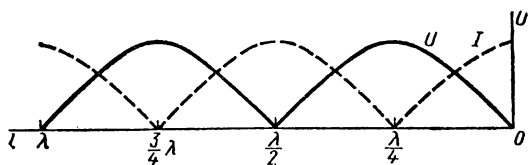


Рис. 23.4

жения $\rho = 0$; в линии имеют место только падающие волны. Такой режим называют *режимом бегущих волн*. Так как $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_B$, то выражения (23.3) и (23.4) принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_2 \cos 2\pi (l/\lambda) + j\dot{I}_2 \sin 2\pi (l/\lambda) = \dot{U}_2; \\ \dot{I} &= \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \cos 2\pi (l/\lambda) + j \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \sin 2\pi (l/\lambda) = \dot{I}_2; \\ \underline{Z}_{BX} &= \dot{U}/\dot{I} = \underline{Z}_B. \end{aligned}$$

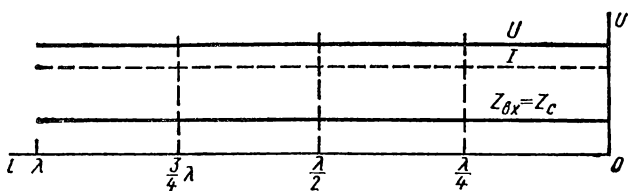


Рис. 23.5

Таким образом, при согласованной нагрузке амплитуда напряжения в любой точке линии без потерь равна амплитуде напряжения на входе линии, ток $\dot{I} = \dot{U}_1/\underline{Z}_{BX} = \dot{U}_2/\underline{Z}_B$, а входное сопротивление в любом сечении равно волновому сопротивлению линии \underline{Z}_B (рис. 23.5).

При несогласованной нагрузке ($\underline{Z}_H \neq \underline{Z}_B$) $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \underline{Z}_H$. В этом случае выражения (23.3) и (23.4) принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_2 [\cos 2\pi (l/\lambda) + j (\underline{Z}_B/\underline{Z}_H) \sin 2\pi (l/\lambda)]; \\ \dot{I} &= \dot{U}_2 [1/\underline{Z}_H \cos 2\pi (l/\lambda) + j (1/\underline{Z}_B) \sin 2\pi (l/\lambda)]. \end{aligned}$$

При этом имеет место режим смешанных волн, который можно рассматривать как наложение режимов бегущих и стоячих волн. Кривые $U = f(l)$ для различных значений $Z_H = R_H$ показаны на рис. 23.6. Чем больше различие между Z_H и Z_B , тем больше различие между максимальными и минимальными напряжениями (рис. 23.7). Если известны U_{\max} и U_{\min} , например, из эксперимента, то коэффициент отражения ρ и коэффициент бегущей волны $K_{БВ}$ можно определить из выражений

$$\rho = (U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min}); K_{БВ} = U_{\min} / U_{\max}.$$

Можно показать, что при $Z_H > Z_B$ $U_{\max} / U_{\min} = Z_H / Z_B$, при $Z_H < Z_B$ $U_{\max} / U_{\min} = Z_B / Z_H$. Коэффициент бегущей волны можно вы-

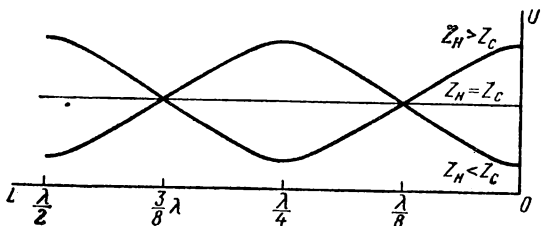


Рис. 23.6

разить также через Z_H и Z_B . При $Z_H > Z_B$ $K_{БВ} = Z_B / Z_H$, при $Z_H < Z_B$ $K_{БВ} = Z_H / Z_B$. Коэффициентом стоячей волны называют величину, обратную коэффициенту бегущей волны: $K_{СВ} = 1 / K_{БВ}$. При нагрузке линии на элементы с чисто реактивным сопротивлением в

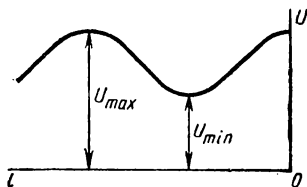


Рис. 23.7

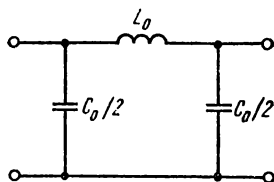


Рис. 23.8

линии образуются стоячие волны так же, как и в режиме холостого хода или короткого замыкания. Однако при этом на выходе линии нет ни узла, ни пучности напряжения, поскольку они сдвигаются вдоль линии. При индуктивной нагрузке узлы и пучности напряжения смещаются влево (в сторону генератора), при емкостной нагрузке — вправо (в сторону нагрузки).

Линию, замкнутую на элемент с чисто реактивным сопротивлением, можно заменить эквивалентным отрезком линии, у которой входное сопротивление равно сопротивлению реактивного элемента. Например, емкостный элемент можно заменить разомкнутым отрезком линии длиной менее $\lambda/4$, а индуктивный — короткозамкнутым отрезком линии длиной менее $\lambda/4$ и т. д. Производя такую замену, можно определить распределение напряжений и токов в эквива-

лентной линии с учетом добавочного (за счет реактивной нагрузки) отрезка. При добавлении разомкнутого отрезка линии на ее конце будет пучность напряжения, а при добавлении короткозамкнутого — узел напряжения. Для сдвига узлов и пучностей напряжений вправо на $\lambda/8$ необходимо подключить конденсатор, емкость которого находится из уравнения $1/(\omega C_H) = Z_B \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{8}$, откуда $C_H = 1/(\omega Z_B) = \sqrt{L_1 C_1} \sqrt{C_1} / \sqrt{L_1} = C_1$.

Для выполнения экспериментов используют искусственную линию, состоящую из 16 одинаковых звеньев. От точек соединения звеньев имеются отводы, все звенья пронумерованы, причем нумерацию производят от конца линии. Данную линию можно рассматривать как каскадное соединение П-образных звеньев (рис. 23.8). Сопротивление потерь каждого звена линии не превышает 1—2 Ом. В качестве реактивной нагрузки использовать L_H или C_H .

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. При $L_1 = L_{зв}$, $C_1 = C_{зв}$ рассчитать длину линии l , которой эквивалентна искусственная линия; частоту f , при которой на линии укладывается одна длина волны λ . Результаты расчетов занести в табл. 23.1.

2. Сравнить сопротивление потерь звена $R_1 = R_{зв}$ со значением ωL_1 . Если $\omega L_1 > 5-10R_1$, то такую линию можно считать линией без потерь. Проводимость потерь G_1 считать пренебрежимо малой.

3. Определить волновое сопротивление Z_B и постоянную γ данной линии.

4. Рассчитать и построить кривые распределения действующих значений напряжения вдоль линии для режимов холостого хода и короткого замыкания, если напряжение пучности равно 2,7 В ($U_{\max} = 2,7$ В).

П р и м е ч а н и е. Следует иметь в виду, что достаточно произвести расчет для одной четверти длины волны, так как при дальнейшем увеличении длины линии распределения напряжений и токов повторяются.

5. Построить кривые $U = f(l)$ при индуктивной и емкостной нагрузке, если $L_H = L_1$; $C_H = C_1$ (табл. 23.1).

Задание. Исследовать распределение напряжений вдоль линии при различных нагрузках.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 23.9. На генераторе установить частоту f , равную получившейся в п. 1 предварительного расчета, а на входе линии — напряжение $U_1 = 2,7$ В. Корпусный вывод вольтметра V_2 подключить к общей точке линии, а потенциальный — к точке 4 линии, т. е. к точке, в которой имеется узел напряжения, поскольку эта точка

отстоит на четверть длины волны от конца линии (на конце разомкнутой линии получают пучность напряжения). Медленно вращая лимб «Частота генератора» в обе стороны, найти в районе частоты f положение, при котором вольтметр V_2 покажет минимальное напряжение. Найденная частота и является той частотой, при которой на линии укладывается одна волна.

2. Подключить потенциальный вывод вольтметра V_2 поочередно ко всем отводам линии и снять зависимость $U = f(l)$. Результаты измерений занести в табл. 23.1.

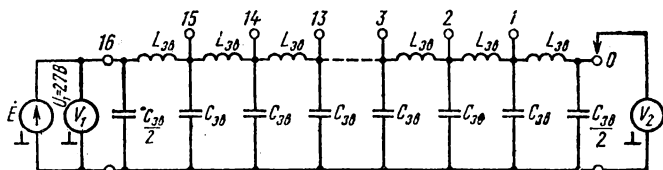


Рис. 23.9

3. Уменьшить напряжение U_1 до нуля (частота генератора остается без изменения), закоротить линию на конце. Вольтметр V_2 подключить к точке 4 линии (в короткозамкнутой линии в этой точке будет пучность напряжения, поскольку на конце получается узел). Установить на входе линии такое напряжение, при котором вольтметр V_2 показывает 2,7 В. Измерить напряжение на каждой точке линии.

4. Нагрузить линию на резистор, сопротивление которого равно волновому ($Z_n = Z_w$). Установить на магазине сопротивлений сопротивление Z_n , а на входе линии—напряжение $U_1 = 2,7$ В. Снять характеристику $U = f(l)$.

5. Подключить к линии нагрузку $Z_n = 2Z_w$; $Z_n = 0,5 Z_w$. Снять характеристики $U = f(l)$ при $U_1 = 2,7$ В $= \text{const}$.

6. Подключить к линии конденсатор C_n . Снять характеристику $U = f(l)$.

7. Подключить к линии катушку L_n . Снять характеристику $U = f(l)$.

Обработка результатов измерений

1. Построить кривые распределения напряжения вдоль линии при всех видах нагрузки, причем кривые, снятые согласно п. 2—4, построить на миллиметровке № 1, а кривые, снятые в соответствии с п. 5—8,— на миллиметровке № 2.

Таблица 23.1

$L_{зв} = ; C_{зв} = ; L_{эк} = ; f = ; \omega L_{зв} = ; Z_B = ; \gamma =$										
Напряжения при $U_{\max} = 2,7 \text{ В}$										
l/λ	Рассчитано теоретически					Получено в эксперименте				
	при холостом ходе	при коротком замыкании	при $Z_H = Z_B$	при $Z_H = jX$	при $Z_H = -jX$	при холостом ходе	при коротком замыкании	при Z_B	при $2Z_B$	при $0,5 Z_B$
1/16										
2/16										
3/16										

2. Рассчитать ρ и $K_{6в}$ для всех исследуемых режимов.
3. Сравнить результаты, полученные экспериментально, с аналогичными результатами, найденными теоретически.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В каких случаях линии передачи энергии рассматривают как цепи с распределенными параметрами?
2. Какими погонными параметрами характеризуются длинные линии? С какой скоростью распространяется электромагнитная волна вдоль линии? Каков физический смысл выражения $\sqrt{L_1 C_1}$?
3. Определите время задержки искусственной линии, состоящей из n звеньев. Рассчитайте частоту, при которой искусственная линия эквивалентна длинной линии с $l = \lambda$. Найдите длину двухпроводной линии, эквивалентной данной искусственной.
4. Что такое волновое сопротивление линии $Z_{в}$? Вычислите $Z_{в}$, если: а) линия имеет потери; б) линия не имеет потерь. Какой физический смысл коэффициента распространения γ ? Запишите уравнения γ для линий: а) с потерями; б) без потерь.
5. Что называют коэффициентом отражения от нагрузки ρ ? В каких пределах может изменяться ρ ? Какие режимы работы в линии вы знаете?
6. Напишите уравнения для определения напряжений и токов в любом сечении линии, если линия: а) имеет потери; б) не имеет потерь. Запишите выражения для распределения напряжений и токов в линии при режиме: а) холостого хода; б) короткого замыкания; в) согласованной нагрузки.
7. Нарисуйте кривые распределения действующих значений токов и напряжений вдоль линии, если $Z_{н} = R_{н} \neq Z_{в}$.
8. Дайте определения коэффициентам бегущей и стоячей волн.
9. Линия без потерь нагружена на индуктивный элемент $X_L = 2 Z_{в}$. На какое расстояние сдвинутся узлы и пучности напряжения по сравнению с режимом короткого замыкания?
10. Линия без потерь нагружена на емкостный элемент $Z_{вх} = 600 \text{ Ом}$; $f = 100 \text{ МГц}$. Найдите расстояние до ближайшей пучности напряжения, если $|X_C| = |Z_{в}|$.
11. Линия без потерь нагружена на индуктивный элемент. Найдите расстояние от конца линии до ближайшего узла напряжения, если $Z_{в} = 600 \text{ Ом}$; $f = 18,7 \text{ МГц}$; $v = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.
12. В каких линиях и при каких условиях образуются стоячие волны?
13. Дано: $R_1 = 2,84 \text{ Ом/км}$; $G_1 = 0,7 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$; $L_1 = 1,94 \times 10^{-3} \text{ Гн/км}$; $C_1 = 6,25 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км}$; $f = 800 \text{ Гц}$. Определите $Z_{н}$, при котором в линии отсутствует отраженная волна.
14. Линия без потерь работает в режиме короткого замыкания; $U_1 = 10 \text{ В}$; $Z_{в} = 600 \text{ Ом}$; $\omega = 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, $v_p = 2,5 \cdot 10^5 \text{ км/с}$; $l = 60 \text{ км}$. Найдите действующее значение тока в конце линии.
15. Для линии без потерь в режиме холостого хода $U_1 = 10 \text{ В}$; $\omega = 5000 \text{ с}^{-1}$; $L_1 = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$, $C_1 = 0,67 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/км}$; $l = 60 \text{ км}$. Рассчитайте действующее значение тока в начале и напряжение в конце линии.

Лабораторная работа № 24

ИССЛЕДОВАНИЕ ВХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ТРАНСФОРМИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ЦЕПЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

При подготовке к выполнению работы необходимо: 1) прочитать по учебнику [1] § 10.3; 2) изучить описание данной работы; 3) заготовить табл. 24.1 и 24.2; 4) выполнить предварительный расчет; 5) ответить на вопросы для самопроверки.

Ц е л ь р а б о т ы: *изучить входные характеристики и трансформирующие свойства цепей с распределенными параметрами*

Входное сопротивление цепи с распределенными параметрами в некотором сечении линии можно рассчитать, поделив комплексное действующее значение напряжения на комплексное действующее значение тока в данном сечении. В общем случае для линии без потерь

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\dot{U}_2 \cos 2\pi (l/\lambda) + j \dot{I}_2 Z_B \sin 2\pi (l/\lambda)}{\dot{I}_2 \cos 2\pi (l/\lambda) + j (\dot{U}_2/Z_B) \sin 2\pi (l/\lambda)},$$

где l/λ — электрическая длина линии.

В режиме холостого хода ($I_2 = 0$) $Z_{\text{вх}}$ имеет чисто мнимый характер:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{вх.х}} &= \frac{\dot{U}_x}{\dot{I}_x} = \frac{U_2 \cos 2\pi (l/\lambda)}{j (U_2/Z_B) \sin 2\pi (l/\lambda)} = \\ &= -j Z_B \operatorname{ctg} 2\pi (l/\lambda) = -j x_{\text{вх.х}}. \end{aligned}$$

Напомним, что для линии без потерь $Z_{\text{вх}} = \sqrt{L_1/C_1}$ — величина вещественная. При $l = 0$ $\underline{Z}_{\text{вх}} = -j \infty$, при $l = \lambda/4$ $\underline{Z}_{\text{вх}} = 0$; при $l = \lambda/2$ $\underline{Z}_{\text{вх}} = j \infty$ и т. д. Зависимость $x_{\text{вх.х}}$ от длины линии показана на рис. 24.1. Как видно из рисунка, входное сопротивление разомкнутой линии длиной менее четверти длины волны имеет емкостный характер, длиной от $1/4$ до $1/2$ — индуктивный характер и т. д. Свойства разомкнутого отрезка линии длиной $1/4$ и $1/2$ подобны свойствам последовательного и параллельного контуров.

В режиме короткого замыкания входное сопротивление линии имеет также чисто реактивный характер:

$$\underline{Z}_{\text{вх.к}} = \frac{\dot{U}_k}{\dot{I}_k} = \frac{j \dot{I}_2 Z_B \sin 2\pi (l/\lambda)}{\dot{I}_2 \cos 2\pi (l/\lambda)} = j Z_B \operatorname{tg} 2\pi (l/\lambda) = j x_{\text{вх.к}}.$$

Зависимость $x_{\text{вх.к}}$ короткозамкнутой линии без потерь от электрической длины l линии изображена на рис. 24.2. Следует обратить внимание на то, что короткозамкнутая линия без потерь длиной в четверть длины волны имеет бесконечно большое входное сопротивление. Если в линии имеются потери, то входное сопротивление не бесконечно, но достаточно велико. Этим свойством короткозамкнутых

четвертьволновых линий часто пользуются на практике. В линии без потерь, нагруженной на резистор, сопротивление которого равно волновому, $U_2 = I_2 Z_B$,

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos 2\pi (l/\lambda) + j \dot{U}_2 \sin 2\pi (l/\lambda) = \dot{U}_2;$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \cos 2\pi (l/\lambda) + j (\dot{U}_2/Z_B) \sin 2\pi (l/\lambda) = \dot{I}_2;$$

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Z_B.$$

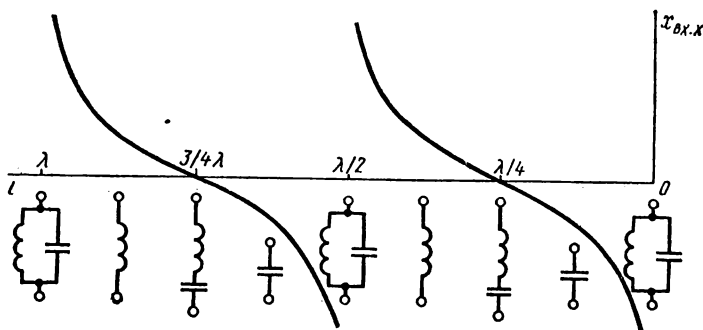


Рис. 24.1

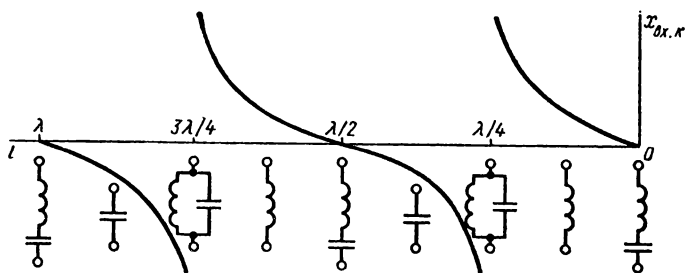


Рис. 24.2

Таким образом, при согласованной нагрузке напряжение на любом расстоянии от конца линии равно напряжению, подведенному от генератора, ток $\dot{I} = \dot{U}_2/Z_B$, а входное сопротивление линии в любом сечении равно волновому: $\underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_B$ (см. рис. 23.5).

Рассмотрим входное сопротивление отрезка линии без потерь длиной $\lambda/4$, нагруженного на резистор $\underline{Z}_H = R_H$ (рис. 24.3). Если в

выражениях для \dot{U} и \dot{I} $l = \lambda/4$, то $\dot{U}_{(\lambda/4)} = j \dot{I}_2 Z_B$; $\dot{I}_{(\lambda/4)} = j \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_{\text{вх}}}$.

При этом входное сопротивление линии

$$Z_{\text{вх}(\lambda/4)} = \frac{U_{(\lambda/4)}}{I_{(\lambda/4)}} = \frac{j I_2 Z_{\text{в}}}{j(U_2/Z_{\text{в}})} = \frac{Z_{\text{в}}^2}{Z_{\text{н}}}$$

Следовательно, входное сопротивление четвертьволновой линии обратно пропорционально сопротивлению нагрузки $Z_{\text{н}}$. Этим свойством четвертьволновых линий широко пользуются для практических целей, например для согласования линии с нагрузкой или для согласования линий с различными волновыми сопротивлениями. Пусть

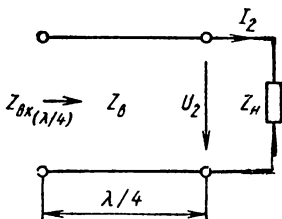


Рис. 24.3

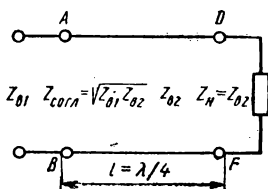


Рис. 24.4

волновое сопротивление первой линии $Z_{\text{в1}}$, второй — $Z_{\text{в2}}$. Чтобы выход первой линии соединить со входом второй, необходимо между этими линиями поставить согласующий трансформатор в виде четверть волнового отрезка линии с волновым сопротивлением $Z_{\text{в}} = \sqrt{Z_{\text{в1}} Z_{\text{в2}}}$ (рис. 24.4). Для $Z_{\text{в1}} = 100 \text{ Ом}$; $Z_{\text{в2}} = 400 \text{ Ом}$ волновое сопротивление согласующей линии $Z_{\text{в}} = \sqrt{Z_{\text{в1}} Z_{\text{в2}}} = 200 \text{ Ом}$. Тогда

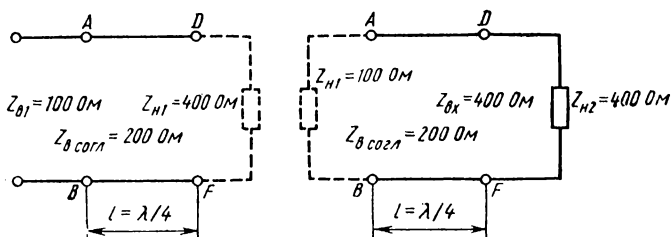


Рис. 24.5

выход первой линии будет нагружен на $R = 200^2/400 = 100 \text{ Ом}$, а вход второй линии подключен к $R = 200^2/100 = 400 \text{ Ом}$ (рис. 24.5).

Таким образом, если первая линия не имеет согласующего трансформатора, то для получения согласованного режима ее следует нагрузить на резистор сопротивлением 100 Ом. Если к концу линии подключить четвертьволновой отрезок с волновым сопротивлением 200 Ом, то для согласованной работы первой линии к выходным точкам согласующей линии (к точкам D , F на рис. 24.4) нужно подключить не 100, а 400 Ом. Аналогично, для согласованной работы второй линии к ее выходу необходимо подключить без какого-либо согласующего устройства источник сопротивлением 100 или 400 Ом, включенный через согласующую линию.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

1. Рассчитать и построить зависимости комплексных входных сопротивлений от длины линий, работающих в режимах холостого хода, короткого замыкания, согласованной нагрузки. Построить соответствующие кривые. (Исходные данные берут в соответствии с номером стенда.)

2. Определить частоты, при которых на линии укладывается длина волны от λ до $(4/16)\lambda$ через $(1/16)\lambda$. Результаты расчетов занести в табл. 24.1.

3. Вычислить входное сопротивление четвертьволнового отрезка линии, нагруженного на резистор сопротивлением $R_n = 15, 50, 100, 200, 400, 800, 1500, 3000, 10\,000, 20\,000$ Ом. Результаты расчетов занести в табл. 24.2.

Задание. Проанализировать зависимость полного сопротивления линии от электрической длины. Исследовать трансформирующие свойства четвертьволнового отрезка линий.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме рис. 24.6. Установить частоту генератора f , при которой длина заданной линии равна λ (см. предварительный расчет к работе № 23), режим холостого хода.

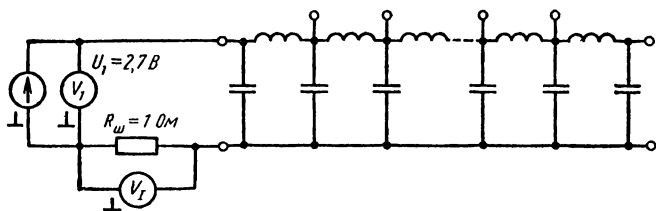


Рис. 24.6

Определить зависимость входного сопротивления линии от электрической длины волны. Для этого следует уменьшить частоту генератора, поддерживая $U_1 = 2,7 \text{ В} = \text{const}$. По мере уменьшения частоты длина волны увеличивается, следовательно, длина линии будет равна не длине волны, а только ее части. Устанавливать поочередно частоты f ; $(15/16)f$; $(14/16)f$; $(13/16)f$... При снижении частоты до $(12/16)f$ входное сопротивление линии уменьшается и при $(12/16)f$ становится минимальным, поскольку $l = (3/4)\lambda$. Изменять частоту следует медленно. При этом входное сопротивление,

Таблица 24.1

$Z_{BX} =$													
l/λ	f , кГц	Рассчитано теоретически			Получено при эксперименте						Рассчитано по экспериментальным данным		
		при $Z_H = Z_B$	при коротком замыкании	при холостом ходе	при $Z_H = 0$		при $Z_H = \infty$		при $Z_H = Z_B$	при коротком замыкании	при холостом ходе		
					$R_{ш},$ Ом	$U_I,$ мВ	$R_{ш},$ Ом	$U_I,$ мВ					
4/16													
5/16													
6/16													
7/16													
8/16													
9/16													
10/16													
11/16													
12/16													
13/16													
14/16													
15/16													
16/16													

а следовательно, входной ток и показания вольтметра V_I меняются в широких пределах.

При выполнении экспериментов нужно своевременно изменять пределы на вольтметре V_I . В районе $(12/16) f$ найти частоту, при которой действующее значение тока максимально, т. е. входное сопротивление — минимально. При этой частоте длина линии равна $(3/4) \lambda$. При дальнейшем снижении частоты входное сопротивление линии увеличивается, ток в цепи и падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора уменьшаются, а напряжение на внешних зажимах генератора увеличивается. Поддерживать неизменным напряжение U_1 . Устанавливать частоты $(11/16) f$; $(10/16) f$; $(9/16) f$; $(8/16) f$ (для точной установки частоты, при которой длина линии равна $(1/2) \lambda$, следует около $(8/16) f$ найти частоту, при которой ток в цепи минимален). Аналогично, установить частоты $(7/16) f$; $(6/16) f$; $(5/16) f$; $(4/16) f$. При частоте $(4/16) f$ длина линии равна $\lambda/4$. Результаты измерений занести в табл. 24.1.

2. Прodelать аналогичные эксперименты в режиме короткого замыкания и согласованной нагрузки.

3. Найти частоту, при которой $l = \lambda/4$. К выходным зажимам линии подключить магазин сопротивлений. Установить значения сопротивлений нагрузки линии в соответствии с п. 3 предварительного расчета. При этом следует учитывать сопротивление линии, равное примерно 15 Ом. При $R_n = 15$ Ом на магазине сопротивлений нужно набрать $R_m = 0$ Ом, при $R_n = 50$ Ом — $R_m = 50 - 15 = 35$ Ом и т. д.

Записать показания вольтметров V_1 , V_I и сопротивление резистора $R_{ш}$. Результаты измерений занести в табл. 24.2.

Таблица 24.2

$U_1 = 2,7 \text{ В} ; Z_B = ; l = \lambda/4$					
$Z_n, \text{ Ом}$	Рассчитано теоретически $Z_{вх}, \text{ Ом}$	Получено при эксперименте		Рассчитано по экспериментальным данным	
		$U_I, \text{ мВ}$	$R_{ш}, \text{ Ом}$	$Z_{вх}, \text{ Ом}$	K
15					
50					
100					
.					
.					
.					

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать и построить зависимости входного сопротивления линии от ее длины по результатам, полученным в п. 1 и 2 порядка выполнения работ.

2. Определить и построить зависимости входного сопротивления четвертьволновой линии от сопротивления нагрузки по результатам, полученным в п. 3 порядка выполнения работ. Найти коэффициент трансформации сопротивлений $K = Z_{вх}/Z_H$.

3. Сравнить результаты, полученные экспериментально, с аналогичными результатами, найденными теоретически.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как рассчитать входное сопротивление четвертьволновой линии, нагруженной на Z_H ?

2. Каков характер изменения входного сопротивления линии по мере увеличения потерь в ней?

3. Вычислить $Z_{вх}$ линии без потерь, если $l = 100$ м; $Z_B = 500$ Ом; $\lambda = 60$ м; $Z_H = 380$ Ом.

4. Найти $Z_{вх}$ короткозамкнутой линии без потерь, если $l = 100$ м; $Z_B = 500$ Ом; $\lambda = 60$ м.

5. Определить $Z_{вх}$ разомкнутой линии без потерь, если $l = \lambda/8$.

6. Линия без потерь находится в режиме холостого хода: $C_1 = 0,0133 \cdot 10^{-6}$ Ф/км; $L_1 = 0,832 \cdot 10^{-3}$ Гн/км; $f = 800$ Гц. Определить наименьшую длину линии, при которой $Z_{вх} = -j200$ Ом.

7. Вычислить емкость конденсатора, включенного в конце воздушной линии без потерь, если расстояние от ее конца до ближайшего узла напряжения равно 10 см; $Z_B = 552$ Ом; $f = 150$ МГц.

8. Для линии без потерь в режиме холостого хода длиной $l = 30$ м, рассчитать наименьшую частоту, при которой она эквивалентна: а) параллельному; б) последовательному колебательному контуру, настроенному в резонанс.

9. Линия с потерями нагружена на цепь, комплексное сопротивление которой равно волновому; $Z_H = Z_B$. Начертите график мгновенного значения тока в некоторой точке линии.

10. Дано: $Z_B = 600$ Ом; $Z_H = 830$ Ом. Найти $Z_{вх}$ согласующего четвертьволнового трансформатора.

Список литературы

1. Попов В. П. Основы теории цепей. — М.: Высшая школа, 1985.
2. Матханов П. Н. Основы анализа электрических цепей: Линейные цепи. — М.: Высшая школа, 1981.
3. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей, — М.: Энергия, 1972.

Приложение

Таблица П.1 Рекомендуемые значения индуктивностей катушек и емкостей конденсаторов для различных стендов

№ стенда	$L_A=L_D=L_F$, мГн	L_B , мГн	$C_A=C_D$, нФ	C_B , нФ	C_H , мкФ	C_M , пФ
1	44,2	27,3	28,3	17,5	0,20	1200
2	51,3	31,7	24,4	15,1	0,15	1050
3	39,8	24,6	27,6	17,1	0,25	1350
4	43,1	26,6	25,5	15,8	0,18	1250
5	46,4	28,7	23,7	14,6	0,15	1100
6	40,6	25,1	26,0	16,1	0,18	1300
7	45,5	28,1	23,2	14,3	0,15	1100
8	38,2	23,6	26,5	16,4	0,17	1400
9	47,8	29,5	21,2	13,1	0,14	1100
10	39,8	24,6	23,5	14,6	0,20	1350
11	45,9	28,4	20,4	12,6	0,14	1100
12	36,2	22,4	23,1	14,3	0,18	1500
13	40,5	25,0	20,7	12,8	0,13	1300
14	33,5	20,7	22,5	13,9	0,15	1600
15	39,8	24,6	18,9	11,7	0,13	1350
16	31,8	19,7	22,1	13,7	0,15	1700
17	37,1	23,0	19,0	11,7	0,13	1450
18	29,5	18,2	22,3	13,8	0,18	1800
19	35,4	21,9	18,6	11,5	0,16	1500
20	29,4	18,2	20,4	12,6	0,17	1800
21	33,1	20,4	18,1	11,2	0,15	1600
22	28,7	17,7	19,1	11,8	0,14	1900
23	33,2	20,6	16,5	10,2	0,12	1600
24	27,3	16,8	19,0	11,7	0,13	1900
25	31,8	19,7	16,2	10,0	0,12	1700
26	26,5	16,4	18,4	11,4	0,14	2040

Таблица П.2. Исходные данные для звеньев искусственной длинной линии

№ стенда	$L_{зв}$, мкГн	$C_{зв}$, пФ	№ стенда	$L_{зв}$, мкГн	$C_{зв}$, пФ
1	200	1000	14	150	1500
2	175	1250	15	125	1800
3	150	1500	16	100	2000
4	125	1800	17	200	1270
5	100	2000	18	175	1500
6	200	1000	19	150	1500
7	175	1270	20	125	1800
8	150	1500	21	162	710
9	125	1800	22	200	1000
10	162	710	23	200	1000
11	200	1000	24	200	1000
12	200	1000	25	180	1250
13	175	1250			

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Введение	5
Лабораторная работа № 1	16
Лабораторная работа № 2	21
Лабораторная работа № 3	33
Лабораторная работа № 4	41
Лабораторная работа № 5	47
Лабораторная работа № 6	52
Лабораторная работа № 7	64
Лабораторная работа № 8	73
Лабораторная работа № 9	80
Лабораторная работа № 10	84
Лабораторная работа № 11	92
Лабораторная работа № 12	101
Лабораторная работа № 13	109
Лабораторная работа № 14	119
Лабораторная работа № 15	126
Лабораторная работа № 16	131
Лабораторная работа № 17	135
Лабораторная работа № 18	141
Лабораторная работа № 19	147
Лабораторная работа № 20	151
Лабораторная работа № 21	159
Лабораторная работа № 22	168
Лабораторная работа № 23	175
Лабораторная работа № 24	184
Список литературы	190
Приложение	191

Учебное издание

Игорь Николаевич Добротворский
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ОСНОВАМ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

Зав. кафедрой *Л. А. Романова*. Редактор *Е. М. Романчук*.
Художественный редактор *Т. М. Скворцова*. Младший редактор *И. А. Исаева*. Технический редактор *Т. Н. Полунина*. Обложка художника
Ю. Д. Федичкина. Корректор *Г. Н. Буханова*.

ИБ № 5412

Изд. № ЭР-414 Сдано в набор 24.01.86. Подп. в печать 13.05.86.
Формат 84×108/32. Бум. тип № 2 Гарнитура литературная. Печать
высокая. Объем 10,08 усл. печ. л. 10,5 усл. кр.-отт. 10,29 уч.-изд. л.
Тираж 16 000 экз. Зак. 1325 Цена 35 коп.
Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул.,
д. 29/14.

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
129041, Москва, Б. Переяславская ул., 46

Цена 35 к.