

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«Витебский государственный технологический университет»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ**

Методические указания по выполнению  
лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники»  
для студентов специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических  
процессов и производств (легкая промышленность)»

Витебск  
2019

УДК 621.38

Составители:

А. В. Ильющенко, В. Ф. Куксевич

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 9 от 27.11.2019.

**Исследование пассивных четырехполюсников** : методические указания по выполнению лабораторных работ / сост. А. В. Ильющенко, В. Ф. Куксевич. – Витебск : УО «ВГТУ», 2019. – 26 с.

Методические указания являются руководством к лабораторным работам по дисциплине «Теоретические основы электротехники» для студентов специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств (легкая промышленность)», содержат общие требования, предъявляемые к выполнению лабораторных работ, описание порядка их выполнения и контрольные вопросы для самостоятельной подготовки студентов.

УДК 621.38

© УО «ВГТУ», 2019

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Теоретическая часть  | 4  |
| <i>1 Основные понятия четырехполюсников</i>  | 4  |
| <i>2 Уравнения четырехполюсника</i>  | 5  |
| <i>3 Системы уравнений четырехполюсников</i>   | 8  |
| <i>4 Режимы работы, входное сопротивление и коэффициенты<br/>    четырехполюсников</i> | 11 |
| <i>5 Эквивалентные схемы четырехполюсников</i>   | 12 |
| <i>6 Частотные характеристики четырехполюсников</i>                                    | 14 |
| <i>7 Расчет характеристики четырехполюсника</i>  | 15 |
| Правила техники безопасности и организации лабораторных работ                          | 17 |
| Краткое описание стенда УИЛС-1   | 18 |
| Лабораторная работа № 1  |    |
| <i>Исследование пассивного R-четырехполюсника</i>                                      | 19 |
| Лабораторная работа № 2  |    |
| <i>Исследование T-образной схемы замещения четырехполюсника</i>                        | 21 |
| Лабораторная работа № 3  |    |
| <i>Исследование Г-образного четырехполюсника</i>                                       | 22 |
| Литература   | 25 |

## Теоретическая часть

### 1 Основные понятия четырехполюсников

Во многих случаях анализа и синтеза электрических цепей важно знать только токи некоторых ветвей и напряжение только между некоторыми узлами. В этом случае расчет цепи упрощается, если цепь разделить на отдельные части, каждая из которых соединена с остальными двумя, тремя, четырьмя и большим числом выводов – полюсов. Например, при определении режима в одной единственной ветви всю остальную часть цепи можно рассматривать как двухполюсник. При расчете методом преобразования выделяются трехполюсники (преобразование сопротивлений «треугольник-звезда»).

В различных областях электротехники и электроники особенно часто применяются аппараты и устройства с двумя парами выводов, при помощи которых они соединяются с другими участками электрической цепи, т. е. четырехполюсники.

На практике четырехполюсники и цепи, которые целесообразно представлять состоящими из нескольких четырехполюсников, применяются, прежде всего, для передачи и преобразования электрических сигналов, несущих информацию. Тракт передачи информации, или канал связи, как правило, состоит из ряда четырехполюсников, включенных между генератором и приемником сигналов. В тракт передачи обычно входят: линия связи генератора и приемника, находящихся часто на значительном расстоянии один от другого; усилители, в которых увеличивается уровень (мощность) сигналов; аттенюаторы (ослабители) уровня сигналов; фильтры для разделения сигналов; трансформаторы, при помощи которых устраняется гальваническая связь между этими участками. К четырехполюсникам относятся также некоторые цепи обратной связи электронных генераторов и усилителей, участки линий передачи электрической энергии, цепи регулирования различных параметров машин (скорости, давления, напряжения) и т. д.

Таким образом, теория четырехполюсников дает возможность единым методом анализировать системы, самые различные по структуре и принципу действия. Кроме того, сложная цепь расчленяется на более простые части, характеристики которых дают полное представление о режиме работы всей цепи.

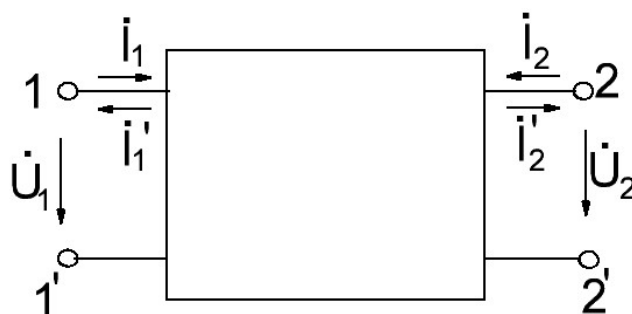


Рисунок 1 – Условное изображение четырехполюсника

Условное изображение четырехполюсника показано на рисунке 1. Одна пара зажимов, к которой подключается источник энергии, называется входной или первичной (1-1'), другая пара зажимов, к которым присоединяется приемник, называется выходной или вторичной (2-2').

Для расчета указываются положительные направления напряжений и токов. Будем считать, что любые участки цепи с парными выводами могут присоединяться только к выводам четырехполюсника, которые обозначены одинаковыми цифрами. Такие четырехполюсники называются проходными. Все четырехполюсники подразделяются на 2 группы: пассивные и активные. В пассивных четырехполюсниках нет зависимых или независимых источников напряжения (ЭДС) или тока, активные четырехполюсники содержат зависимые или независимые источники. Пассивными четырехполюсниками являются, например, линии передачи сигналов, трансформаторы, аттенюаторы и др. К активным относятся усилители на транзисторах или лампах, ОУ и т. д.

Четырехполюсники могут быть симметричными и несимметричными, в зависимости от того, меняются или нет режимы в выделенных ветвях при перемене мест входных и выходных зажимов. Четырехполюсники бывают также обратимыми и необратимыми. Обратимыми называются такие четырехполюсники, для которых выполняется принцип взаимности, т. е. отношение напряжения на входе к току на выходе или отношение напряжения на выходе к току на входе, т. е. взаимное сопротивление контуров, не зависит от того, какая пара зажимов является входной, а какая – выходной. Линейные пассивные четырехполюсники являются обратимыми.

Основная задача анализа четырехполюсников заключается в том, чтобы, используя некоторые обобщенные параметры, аналитически связать напряжения и токи на входе и на выходе, не производя расчетов токов и напряжений внутри четырехполюсников. Предполагается, что напряжение и токи источников питания, которые могут подключаться к выводам 1-1' и 2-2', а значит напряжения и токи на всех участка цепи синусоидальные.

Зависимости между двумя напряжениями и токами, определяющими режим на первичных и вторичных выводах, могут быть записаны в различной форме. Если считать две из указанных величин заданными, то две другие величины будут связаны с ними системой двух уравнений, которые называют уравнениями четырехполюсника.

## 2 Уравнения четырехполюсника

Для любого пассивного четырехполюсника напряжение  $U_1$  и ток  $I_1$  на входе связаны с напряжением  $U_2$  и током  $I_2$  на выходе двумя основными уравнениями:

$$U_1 = AU_2 + BI_2, \quad (2.1)$$

$$\dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2. \quad (2.2)$$

В этих уравнениях комплексные коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  зависят от схемы внутренних соединений составляющих четырехполюсных элементов, от значений сопротивлений схемы и от частоты. Для каждого четырехполюсника их можно определить расчетным или опытным путем. Коэффициенты связаны соотношением

$$AD - BC = 1. \quad (2.3)$$

Выведем уравнения (2.1) и (2.2). Для этого к зажимам 1-1' подключим источник  $ABC \dot{E}_1 = \dot{U}_1$ , а к зажимам 2-2' – нагрузку  $Z_2$ . (рис. 2).

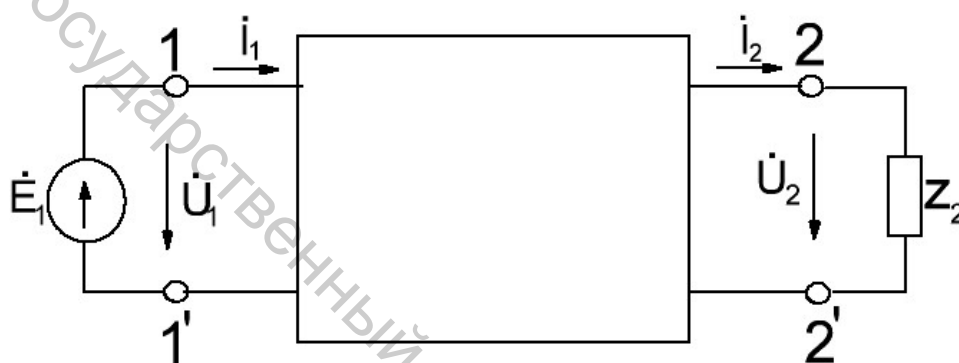


Рисунок 2 – Схема подключения четырехполюсника с нагрузкой на выходе

Напряжение на нагрузке  $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_2$ . Согласно принципу компенсации заменим  $\dot{U}_2$  на ЭДС  $\dot{E}_2$ , численно равную  $\dot{U}_2$ , но направленную навстречу  $\dot{I}_2$  (рис. 3).

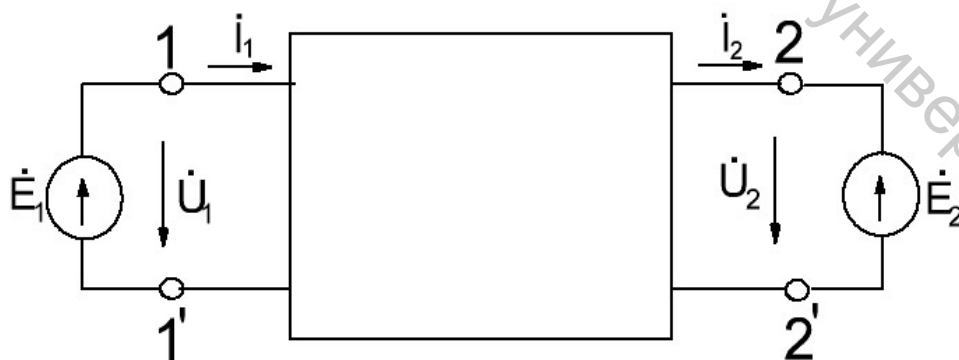


Рисунок 3 – Схема подключения четырехполюсника с источником ЭДС на выходе

Запишем выражения для токов  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  через  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_2$ , входные и взаимные проводимости ветвей, считая токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$  контурными токами.

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_1 Y_{11} - \dot{E}_2 Y_{12}, \quad (2.4)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{E}_1 Y_{21} - \dot{E}_2 Y_{22}. \quad (2.5)$$

С учетом того, что взаимные проводимости четырехполюсника равны  $Y_{12} = Y_{21}$ , из (2.5), получим

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \frac{Y_{22}}{Y_{21}} + \dot{I}_2 \frac{1}{Y_{21}}. \quad (2.6)$$

Подставив (2.6) в (2.4), получим

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_2 \frac{Y_{11} Y_{22} - Y_{12}^2}{Y_{12}} + \dot{I}_2 \frac{Y_{11}}{Y_{12}}. \quad (2.7)$$

Обозначив

$$A = \frac{Y_{22}}{Y_{21}}; B = \frac{1}{Y_{12}}; C = \frac{Y_{11} Y_{22} - Y_{12}^2}{Y_{12}}; D = \frac{Y_{11}}{Y_{12}} \quad (2.8)$$

и заменив ЭДС на напряжение, получаем основные уравнения четырехполюсника, в которых выполняется соотношение (2.3).

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A \dot{U}_2 + B \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = C \dot{U}_2 + D \dot{I}_2 \end{cases} \quad (2.9)$$

Проверим справедливость соотношения (2.3):

$$AD - BC = \frac{Y_{11} Y_{22}}{Y_{12}} - \frac{Y_{11} Y_{22} - Y_{12}^2}{Y_{12}} = 1 \quad (2.10)$$

Если поменять местами входные и выходные зажимы, т. е. к зажимам 1-1' подключить нагрузку  $Z_2$ , а к зажимам 2-2' – ЭДС  $\dot{E}_1$ , то система уравнений с учетом принятых ранее обозначений примет вид

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{D}\dot{U}_2 + \dot{B}\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{C}\dot{U}_2 + \dot{A}\dot{I}_2 \end{cases} \quad (2.11)$$

### 3 Системы уравнений четырехполюсников

В зависимости от того, какие две из четырех величин ( $\dot{U}_1, \dot{I}_1; \dot{U}_2, \dot{I}_2$ ) являются независимыми, а какие зависимыми, всего можно составить 6 различных по форме, но по существу эквивалентных, т. е. математически равносильных, пар уравнений. При рассмотренных положительных направлениях напряжений и токов их связывают уравнение типа  $A$ , считают известными  $\dot{U}_2$  и  $\dot{I}_2$ .

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{A}_{11}\dot{U}_2 + \dot{A}_{12}\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{A}_{21}\dot{U}_2 + \dot{A}_{22}\dot{I}_2 \end{cases} \quad (3.1)$$

Или в матричной форме

$$\begin{Bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{Bmatrix} = A \begin{Bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

где  $\begin{Bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{Bmatrix}$  и  $\begin{Bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{Bmatrix}$  – матрицы-столбцы напряжения и тока соответственно на

первичных и вторичных выводах,

$\dot{A} = \begin{Bmatrix} \dot{A}_{11} & \dot{A}_{12} \\ \dot{A}_{21} & \dot{A}_{22} \end{Bmatrix}$  – квадратная матрица коэффициентов. Ее называют

матрицей передачи, т. к. она связывает входные ток и напряжение ( $\dot{U}_1$  и  $\dot{I}_1$ ) с входными током и напряжением ( $\dot{U}_2$  и  $\dot{I}_2$ ).

Элемент  $\dot{A}$ -матрицы определяется из (3.2) при холостом ходе и коротком замыкании на выходе:



$$A_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{I_2 = 0} \quad - \text{ обратный коэффициент передачи по напряжению при}$$

холостом ходе на выходе;

$$A_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{U_2 = 0} \quad - \text{ сопротивление передачи от входа к выходу при}$$

коротком замыкании выхода;

$$A_{21} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{I_2 = 0} \quad - \text{ проводимость передачи от входа к выходу при}$$

холостом ходе на выходе;

$$A_{22} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right|_{U_2 = 0} \quad - \text{ обратный коэффициент передачи по току при}$$

коротком замыкании на выходе.

Кроме уравнений типа  $A$  существуют уравнения типов  $B, Y, Z, H, G$ . Если в качестве независимых переменных выбраны токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , то их связь с напряжениями  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$  устанавливается уравнениями типа  $Z$ .

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{Z}_{11}\dot{U}_2 + \dot{Z}_{12}\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{Z}_{11}\dot{U}_2 + \dot{Z}_{22}\dot{I}_2 \end{cases} \quad (3.3)$$

Или в матричной форме

$$\begin{Bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{Bmatrix} = Z \begin{Bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

Тогда  $\dot{Z}_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2 = 0}$  – входное сопротивление четырехполюсника при

холостом ходе на выходе.

$$\dot{Z}_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1 = 0} \quad - \text{сопротивление передачи от входа к выходу при}$$

холостом ходе на входе;

$$\dot{Z}_{21} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{I}_2 = 0} \quad - \text{сопротивление передачи от выхода к входу при}$$

разомкнутым выходе;

$$\dot{Z}_{22} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{I}_1 = 0} \quad - \text{выходное сопротивление четырехполюсника при}$$

холостом ходе на входе.

При рассмотрении работы транзисторов наиболее часто применяются уравнения типа  $H$ , при этом независимыми являются  $\dot{I}_1$  и  $\dot{U}_2$ . Тогда

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{H}_{11}\dot{U}_2 + \dot{H}_{12}\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{H}_{21}\dot{U}_2 + \dot{H}_{22}\dot{I}_2 \end{cases} \quad (3.5)$$

Или в матричной форме

$$\begin{Bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{Bmatrix} = H \begin{Bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

где  $\dot{H}_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2 = 0}$  – входное сопротивление транзистора при

короткозамкнутых выходных зажимах;

$$\dot{H}_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_1 = 0} \quad - \text{коэффициент обратной связи по напряжению при}$$

холостом ходе на входных зажимах;

$$H_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{U_2 = 0} \quad - \text{коэффициент усиления по току при коротком}$$

замыкании выходных зажимов;

$$H_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{I_1 = 0} \quad - \text{полная выходная проводимость транзистора при}$$

холостом ходе на входных зажимах.

#### 4 Режимы работы, входное сопротивление и коэффициенты четырехполюсников

При расчетах режимов работы четырехполюсника с применением различных типов уравнений принято выбирать положительные направления токов неодинаковыми. Причем для разных типов уравнений эти направления различны. Уравнения типа  $H$  с симметричными относительно первичных и вторичных выводами положительными направлениями токов выбирают при анализе неавтономных активных четырехполюсников, содержащих полупроводниковые приборы.

Отношения напряжения  $\dot{U}_1$  к току  $\dot{I}_1$  при питании четырехполюсника со стороны первичных выводов и сопротивлением нагрузки  $Z_{2H}$  на вторичных называются входным сопротивлением четырехполюсника со стороны первичных выводов  $Z_{1ВХ}$ . При питании четырехполюсника со стороны вторичных выводов и сопротивлении нагрузки  $Z_{1H}$  на первичных выводах

отношение  $\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}$  – входное сопротивление четырехполюсника со стороны

вторичных выводов  $Z_{2ВХ}$ . Входное сопротивление четырехполюсника определяет режим работы источника питания и зависит от структуры и параметров составляющих четырехполюсник элементов, то есть коэффициентов четырехполюсника, а также от сопротивления нагрузки.

Для определения входных сопротивлений можно воспользоваться любым типом уравнений, однако наиболее простые выражения получаются, если соответственно выбрать уравнения типов  $A$  и  $B$ .

Коэффициенты уравнения четырехполюсника постоянны (при заданной частоте) и определяются только структурой четырехполюсника и параметрами составляющих его элементов. С точки зрения режимов на первичных и вторичных выводах четырехполюсники, имеющие одинаковые значения коэффициентов, неотличимы, то есть эквивалентны, хотя их внутренняя структура может быть совершенно различной. Таким образом, можно считать, что четырехполюсник задан, если известны его коэффициенты. Матрица

коэффициентов одного из типов уравнений может быть выражена через матрицу коэффициентов любого другого типа уравнений.

Первичные параметры каждого данного четырехполюсника могут быть определены экспериментально при измерении режимов на первичных и вторичных выводах. В цепях постоянного тока для вычисления коэффициентов достаточно измерить напряжения и токи. В цепях синусоидального тока необходимо еще определить углы сдвига фаз между соответствующими величинами.

Сопротивления короткого замыкания и холостого хода четырехполюсника однозначно определяются его коэффициентами. Между четырьмя сопротивлениями короткого замыкания и холостого хода существует прямая зависимость

$$\frac{\dot{Z}_{1K}}{\dot{Z}_{1X}} = \frac{\dot{Z}_{2K}}{\dot{Z}_{2X}} \quad (4.1)$$

## 5 Эквивалентные схемы четырехполюсников

Четырехполюсники эквиваленты, если при замене одного четырехполюсника другим режимы источника питания и приемника не изменяются.

Режим любого проходного четырехполюсника задается одной из систем двух уравнений, каждая из которых содержит в общем случае 4 независимых коэффициента. Поэтому наиболее простая эквивалентная схема или схема замещения четырехполюсника должна содержать не менее 4 элементов, параметры которых зависят от коэффициентов уравнений.

Пассивные четырехполюсники имеют 3 независимых коэффициента. Поэтому для них обычно выбирают одну из трех канонических схем замещения: Т-образную (рис. 4), П-образную (рис. 5), Х-образную (мостовую) (рис. 6). У Т- и П-образных схем соединены накоротко выводы 1' и 2'.

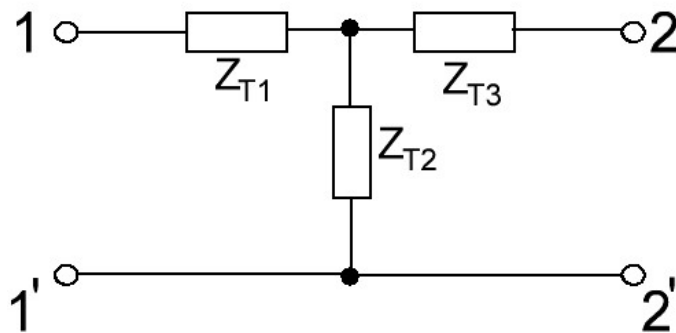


Рисунок 4 – Т-образная схема замещения четырехполюсника

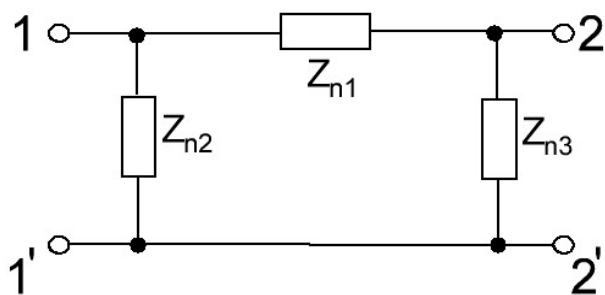


Рисунок 5 – П-образная схема замещения четырехполюсника

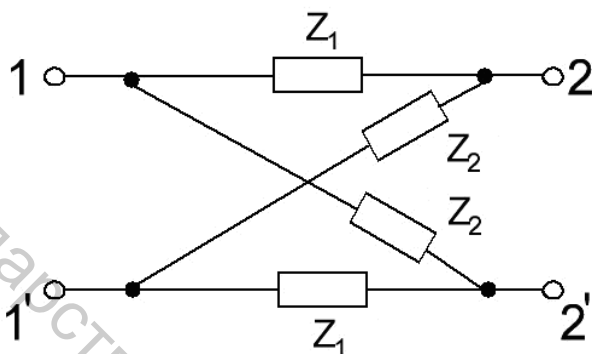


Рисунок 6 – Х-образная (мостовая) схема замещения четырехполюсника

Такие четырехполюсники называются неуравновешенными и применяются в цепях, для которых необходимо иметь общую точку. К ней присоединяются корпуса приборов, оболочки кабелей и т. д. Мостовая или Х-образная схема уравновешенная, у нее взаимная замена соответственно выводов 1 и 1', 2 и 2' не приводит к изменению режима в участках электрической цепи, присоединяемых к первичным и вторичным выводам. Т- и П-образные схемы можно сделать уравновешенными, если разделить сопротивление симметрично по плечам.

Мостовая схема выбирается как основная для предварительного синтеза симметричных четырехполюсников. Т- и П-образные, мостовые схемы, состоящие из резистивных элементов, применяются для изменения уровня сигналов и называются аттенюаторами или удлинителями.

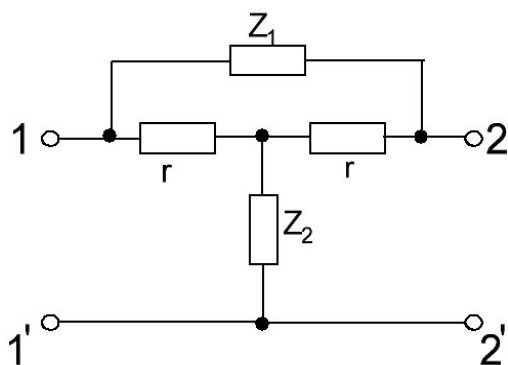


Рисунок 7 – Т-образная симметричная схема замещения четырехполюсника

Симметричные непонятные Т-образные четырехполюсники (рис. 7) применяются в качестве амплитудных корректоров, т. е. четырехполюсников, которые включаются в цепь передачи сигналов для требуемого изменения ее амплитудно-частотной характеристики.

## 6 Частотные характеристики четырехполюсников

При анализе электрических цепей важным является вопрос о том, какими будут токи и напряжения на выходе какого-либо устройства при известных токах и напряжениях на его входе. Ответ на этот вопрос может быть получен, если будут известны так называемые передаточные характеристики, выражающие связи между входными и выходными напряжениями и токами анализируемого устройства. При рассмотрении работы четырехполюсников в цепях переменного синусоидального тока передаточные характеристики приобретают смысл передаточных функций электрических цепей.

Передаточная функция цепи есть отношение выходной величины к входной, выраженное в комплексной форме. Примеры передаточных функций:

– передаточная функция по напряжению  $\dot{H}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ ;

– передаточная функция по току  $\dot{H}(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}$ ;

– взаимное сопротивление  $\dot{H}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$ ;

– взаимная проводимость  $\dot{H}(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$ ;

Передаточные функции цепей имеют комплексный характер. При этом модуль и аргумент передаточной функции зависит не только от схемы цепи и её параметров, но и от частоты. При анализе электро- и радиотехнических цепей наиболее часто используется понятие передаточной функции цепи в виде передаточной функции по напряжению. В этом случае

$$\dot{H}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_2}{U_1} e^{j(\psi_2 - \psi_1)} = A(\omega) e^{j(\psi_2 - \psi_1)}, \quad (6.1)$$

где  $A(\omega) = \frac{U_2}{U_1}$  – модуль передаточной функции, выражающий отношение действующих (или амплитудных) значений выходного и входного напряжений;  $\varphi(\omega) = \psi_2 - \psi_1$  – аргумент передаточной функции, выражающий сдвиг по фазе между выходным и входным напряжениями.

Зависимость модуля и аргумента передаточной функции от частоты  $\omega$  объясняется зависимостью реактивных сопротивлений элементов цепи от частоты.

Различают следующие характеристики цепи:

$H(j\omega)$  – амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ),

$A(j\omega)$  – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ),

$\varphi(\omega)$  – фазочастотная характеристика (ФЧХ).

Свойства четырехполюсников могут описываться с помощью понятий об амплитудно-частотных и фазовых характеристиках.

## 7 Расчет характеристики четырехполюсника

Рассмотрим пример расчёта частотных характеристик четырехполюсника, изображенного на рисунке 8.

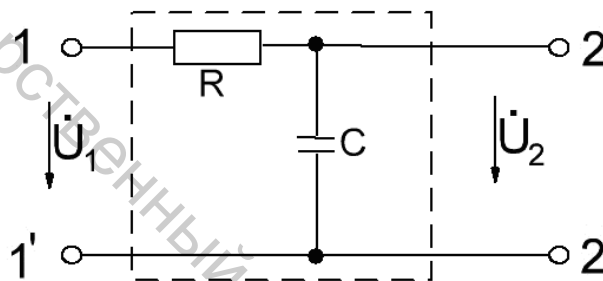


Рисунок 8 – Расчетная схема четырехполюсника

Передаточная функция по напряжению имеет вид:

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{U}_1}{R + \frac{1}{-j\omega C}} \cdot \frac{1}{\dot{U}_1} = \frac{1}{1 + jR\omega C} \quad (7.1)$$

Выделим аргумент и модуль передаточной функции

$$H(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (R\omega C)^2}} e^{-j\arctg R\omega C} \quad (7.2)$$

где

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (R\omega C)^2}}$$

и

$$\varphi(\omega) = -\arctg R\omega C$$

Полученные выражения  $A(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$  представляют собой АЧХ и ФЧХ данного четырехполюсника (рис. 9).

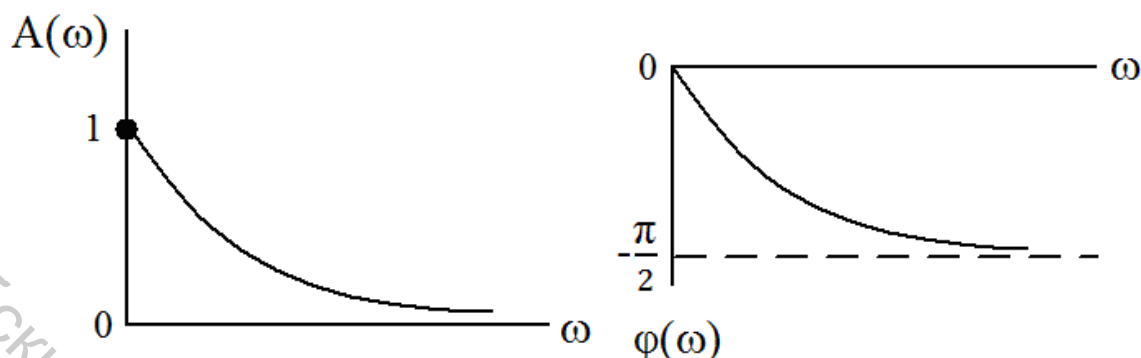


Рисунок 9 – АЧХ и ФЧХ четырехполюсника

Как следует из вида характеристик, с увеличением частоты отношение выходного напряжения к входному напряжению данного четырехполюсника уменьшается, а сдвиг по фазе между этими напряжениями растет.

Частотные характеристики четырехполюсников могут быть получены экспериментально. Для этого проводятся измерения выходных и входных значений напряжений и токов, а также фазовых сдвигов между ними при различных значениях частоты. Экспериментальное получение частотных характеристик делает их удобными при описании свойств четырехполюсников (усилителей, преобразователей, фильтров и т. д.)



## Правила техники безопасности и организации лабораторных работ

При нарушении правил техники безопасности стенды лаборатории могут оказаться источником опасности поражения электрическим током. Поражение электрическим током тела человека может привести к тяжелым поражениям нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой систем. Опасность возрастает с увеличением напряжения, так как при больших напряжениях протекают большие токи. В связи с этим во время лабораторных занятий необходимо строго соблюдать правила техники безопасности:

а) доступ к стендам и аппаратуре во время занятий производится только с разрешения преподавателя;

б) перед началом сборки электрической цепи на стенде убедиться, что все источники питания отключены, проверить исправность изоляции, состояние наконечников и штырей соединительных проводов;

в) включение стенда под напряжение выполнять только после проверки преподавателем или лаборантом правильности сборки схемы;

г) в случае возникновения неисправностей приборов или других элементов исследуемой цепи должны быть отключены все источники питания стенда;

д) при выполнении работы строго запрещается касаться руками, авторучкой, карандашом и другими предметами неизолированных точек или участков цепи, находящихся под напряжением;

е) всем студентам до начала лабораторных занятий необходимо ознакомиться с инструкцией по технике безопасности, имеющейся в лаборатории и строго соблюдать ее положения во время лабораторных занятий.

При проведении занятий в лаборатории учебная группа делится на бригады. Каждый студент должен иметь свою рабочую тетрадь для записей результатов измерений и графических построений во время лабораторных занятий.

При оформлении отчета по очередной лабораторной работе в рабочей тетради необходимо записать название и цель работы, начертить электрические схемы исследуемых цепей, таблицы для занесения экспериментальных и расчетных результатов и записать формулы, необходимые для выполнения вычислений.

После того, как необходимые вычисления выполнены, и экспериментальные данные проверены преподавателем, стенд отключается, исследуемая цепь разбирается и далее следует обработка результатов измерений, выполнение необходимых расчетов, заполнение таблиц и окончательное оформление отчета (схемы, таблицы, графики, векторные диаграммы рекомендуется вычерчивать карандашом и обязательно с помощью чертежных инструментов строго по действующему ГОСТу).

Преподаватель проверяет оформленный отчет, графики и при отсутствии замечаний разрешает студенту защищать работу. Если преподавателем будет предложено переделать какую-либо часть отчета, то в этом случае исправления

вносятся в текст при помощи корректирующих материалов с тем расчетом, чтобы исправленная работа представляла единое целое. Листы с большим числом исправлений следует переделать полностью.

При защите лабораторной работы каждому студенту задаются контрольные вопросы по теоретическим, опытным, расчетным и графическим материалам данной работы. Условием защиты работы являются удовлетворительные ответы на поставленные вопросы и правильно оформленный отчет. Отчеты по работе остаются для хранения на кафедре.

### Краткое описание стенда УИЛС-1

Универсальный учебно-исследовательский лабораторный стенд УИЛС-1, предназначенный для выполнения лабораторных работ по изучению электрических цепей, включает в себя пульт, набор элементов, соединительных проводов и специальный лабораторный стол. Пульт состоит из источников энергии, электронного ключа, наборного поля и регулируемых пассивных элементов.

В источники энергии входят:

- блок постоянных напряжений, содержащий источник регулируемого стабилизированного напряжения ( $U = 0...25 \text{ В}$ ,  $I = 0...1 \text{ А}$ ) и источник нерегулируемого напряжения ( $U = 20 \text{ В}$ ,  $I = 0...1 \text{ А}$ );
- блок переменного напряжения, представляющий собой регулируемый стабилизированный источник, обеспечивающий параметры  $U = 5...25 \text{ В}$  и  $I = 0...1 \text{ А}$  при  $f = 0,1...8,0 \text{ кГц}$ ;
- блок трехфазного напряжения – трехфазный источник с независимыми фазами, напряжение которых регулируется ступенчато от  $0$  до  $40 \text{ В}$  через  $1 \text{ В}$  при  $f = 50 \text{ Гц}$ . Допустимый ток – до  $1 \text{ А}$ .

При превышении током значения  $1 \text{ А}$  имеющаяся в каждом источнике защита отключает их от цепи.

Электронный ключ применяется при анализе переходных процессов и представляет собой замыкающий и размыкающий полупроводниковые ключи с внутренней либо внешней синхронизацией.

Наборное поле, расположенное в центре пульта, представляет собой панель с 67 парами гнезд, предназначенными для подключения элементов исследуемой цепи (сплошные линии на наборном поле между гнездами обозначают их электрическое соединение между собой).

Регулируемые пассивные элементы расположены справа от наборного поля и включают в себя:

- блок переменного сопротивления с возможностью получения на выходе  $R_4$  сопротивления в диапазоне  $0...999 \text{ Ом}$  при допустимой мощности рассеивания –  $5 \text{ Вт}$ ;
- блок переменной емкости, обеспечивающий на выходе  $C_4$  изменение емкости от  $0,01$  до  $9,99 \text{ мкФ}$ ;

– блок переменной индуктивности, позволяющий получить на выходе  $L_4$  индуктивность в диапазоне  $0,1 \dots 99,9$  мГн при допустимом токе до  $0,2$  А.

К выходам  $R_1 - R_3$ ,  $C_1 - C_3$ ,  $L_1 - L_3$  блоков подключены пассивные элементы с нерегулируемыми параметрами.

В комплекс стенда входят также элементы наборного поля (стандартные резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности), соединительные провода и переключки. Имеющиеся в стенде измерительные приборы предназначены только для контроля работы источников.

При помощи стенда УИЛС-1 возможно проведение исследования линейных и нелинейных электрических цепей постоянного и переменного токов, трехфазных электрических цепей, переходных процессов в электрических цепях.

## Лабораторная работа № 1

### Исследование пассивного R-четырёхполюсника

**Цель работы:** изучение методики комплексного исследования электрической цепи постоянного тока при помощи теории четырёхполюсников, исследование режимов при изменении нагрузки, режимов холостого хода и короткого замыкания со стороны входных и выходных зажимов.

### Порядок выполнения работы

1. Выбрать произвольно из комплекта элементов наборного поля четыре резистора  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ .

2. Собрать на наборном поле цепь, представленную на рисунке 10. Регулирующий источник подключить к зажимам 1-1'. Переменную нагрузку подключить к зажимам 2-2'.

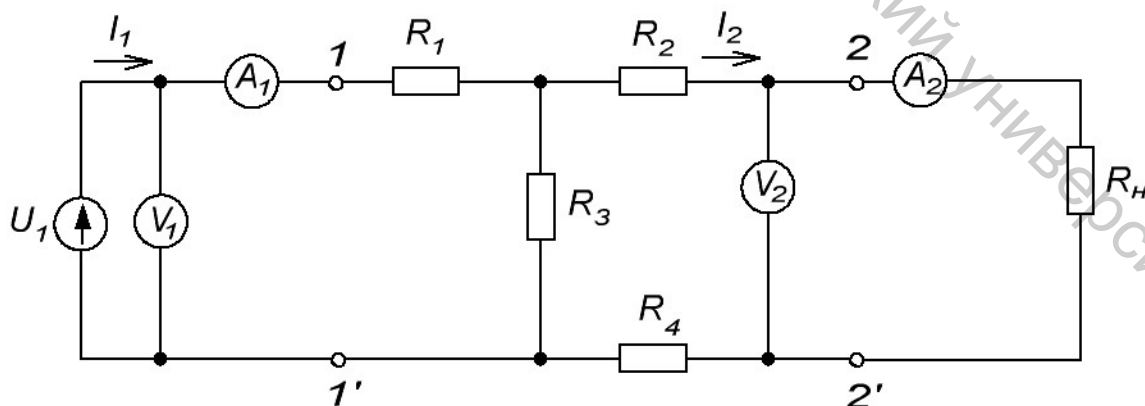


Рисунок 10 – Схема исследуемого четырёхполюсника

3. Установить значение входного напряжения регулируемого источника  $10\text{ В}$ , измерить напряжение  $U_{\text{вх}}$ , данные записать в таблицу 1.

4. Установить на переменной нагрузке начальное значение сопротивления нагрузки  $100\text{ Ом}$ .

5. Изменяя сопротивление нагрузки через  $100\text{ Ом}$  от  $100$  до  $900\text{ Ом}$ , измерить значения входного  $I_1$  и выходного  $I_2$  токов, напряжения на выходных зажимах четырехполюсника  $U_2$ . Данные занести в таблицу 1.

6. Вычислить значение входного сопротивления  $R_{\text{in}}$ , входной  $P_1$  и выходной  $P_2$  мощностей, коэффициента передачи  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ .

Таблица 1

| № п/п | $R_n$ ,<br>Ом | $U_1$ ,<br>В | $I_1$ ,<br>мА | $R_{\text{in}}$ ,<br>Ом | $P_1$ ,<br>мВт | $U_2$ ,<br>В | $I_2$ , мА | $P_2$ ,<br>мВт | $\eta$ |
|-------|---------------|--------------|---------------|-------------------------|----------------|--------------|------------|----------------|--------|
| 1.    |               |              |               |                         |                |              |            |                |        |
| ...   |               |              |               |                         |                |              |            |                |        |
| 9.    |               |              |               |                         |                |              |            |                |        |

7. По данным таблицы 1 построить графики  $\eta(R_n)$  и  $R_{\text{in}}(R_n)$ .

8. Провести опыты холостого хода и короткого замыкания со стороны выходных зажимов. По измеренным значениям тока  $I_{10}$  и напряжения  $U_{10}$  на входе при холостом ходе определить сопротивление  $R_{10}$ .

Провести опыт короткого замыкания четырехполюсника. Для этого закоротить зажимы на выходе 2-2'. Определить параметры короткого замыкания: ток  $I_{1к}$  и напряжение  $U_{1к}$ , по их значениям определить сопротивление  $R_{1к}$ .

9. Провести опыты холостого хода и короткого замыкания со стороны входных зажимов. Установить напряжение  $10\text{ В}$  и подключить к зажимам 2-2'. Измерить напряжение  $U_{20}$  и ток  $I_{20}$  при холостом ходе и коротком замыкании  $U_{2к}$  и  $I_{2к}$ . Определить сопротивления  $R_{20}$  и  $R_{2к}$ .

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение четырехполюсника.
2. Какие четырехполюсники называют проходными.
3. Какие четырехполюсники называют обратимыми.
4. Дайте определение характеристического сопротивления.
5. Какие четырехполюсники называются пассивными.

## Лабораторная работа № 2

### Исследование T-образной схемы замещения четырехполюсника

**Цель работы:** изучение методики исследования T-образного четырехполюсника на переменном токе, режимов при изменении частоты питающего напряжения, режимов холостого хода и короткого замыкания со стороны входных и выходных зажимов.

### Порядок выполнения работы

1. Выбрать из комплекта элементов наборного поля катушку индуктивности  $L=5\text{ мГн}$ , конденсатор  $C=0,5\text{ мкФ}$  и резистор  $r=240\text{ Ом}$ .
2. Собрать на наборном поле цепь, представленную на рисунке 11. Регулируемый источник питания переменной частоты подключить к зажимам 1-1'. Переменную нагрузку подключить к зажимам 2-2'.

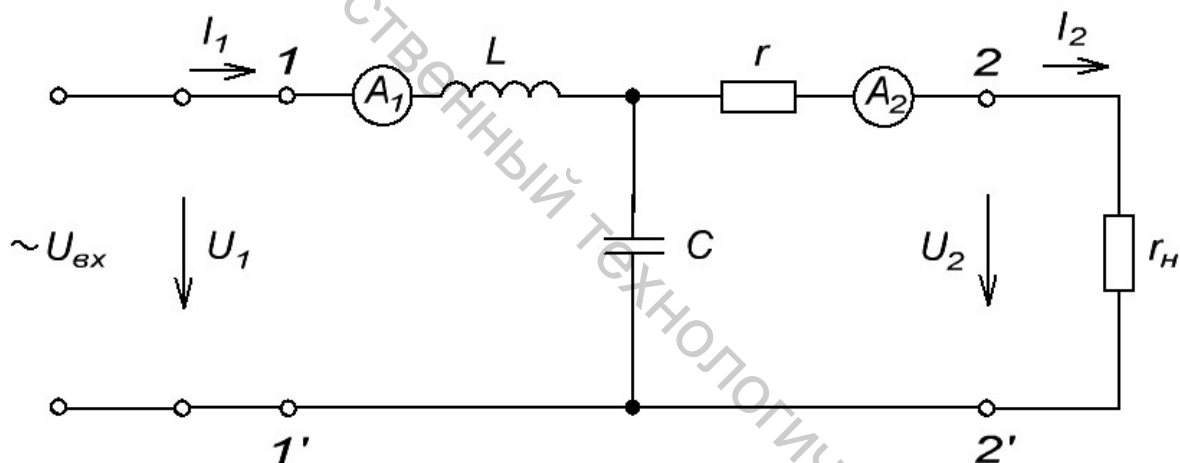


Рисунок 11 – Схема T-образного четырехполюсника

3. Установить значение входного напряжения регулируемого источника  $10\text{ В}$ , измерить вольтметром напряжение  $U_1$ , данные занести в таблицу 2.
4. Установить на переменной нагрузке начальное значение сопротивления нагрузки  $400\text{ Ом}$ .
5. Изменяя частоту входного напряжения от  $0,5$  до  $8,5\text{ кГц}$ , поддерживая при этом постоянную величину  $U_{ex}=10\text{ В}$ , измерить значения входного  $I_1$  и выходного токов  $I_2$ , напряжения на выходных зажимах 2-2'. Данные занести в таблицу 2.

Построить графики зависимостей  $U_2$  и  $I_2$  от частоты  $f$ .

6. Вычислить значение входного сопротивления  $R_{in}$ , входной  $P_1$  и выходной  $P_2$  мощностей, коэффициента передачи  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ . По данным таблицы 2 построить зависимости  $\eta(f)$  и  $R_{in}(f)$ .

7. Провести опыты холостого хода и короткого замыкания со стороны выходных зажимов. По измеренным значениям тока  $I_{10}$  и напряжения  $U_{10}$  на входе при холостом ходе определить сопротивление  $R_{10}$ .

Провести опыт короткого замыкания четырехполюсника. Для этого закоротить зажимы 2-2' на выходе. Определить параметры короткого замыкания: ток  $I_{1к}$  и напряжение  $U_{1к}$ ; по их значениям определить сопротивление  $R_{1к}$ .

8. Провести опыты холостого хода и короткого замыкания со стороны входных зажимов. Установить напряжение  $10\text{ В}$  и подключить к зажимам 2-2'. Частоту установить  $4,5\text{ кГц}$ . Измерить напряжение  $U_{20}$  и ток  $I_{20}$  при холостом ходе и коротком замыкании  $U_{2к}$  и  $I_{2к}$ . Определить сопротивления  $R_{20}$  и  $R_{2к}$ .

Таблица 2

| № п/п | $f$ ,<br>кГц | $U_1$ ,<br>В | $I_1$ ,<br>мА | $R_{in}$ ,<br>Ом | $P_1$ ,<br>мВт | $U_2$ ,<br>В | $I_2$ ,<br>мА | $P_2$ ,<br>мВт | $\eta$ |
|-------|--------------|--------------|---------------|------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------|
| 1.    | 0,5          |              |               |                  |                |              |               |                |        |
| ...   | ...          |              |               |                  |                |              |               |                |        |
| 9.    | 8,5          |              |               |                  |                |              |               |                |        |

### Контрольные вопросы

1. Почему схема называется Г-образной.
2. Чем объяснить наличие трех элементов схемы.
3. Объяснить ход частотных характеристик.
4. Какие четырехполюсники называются неавтономными.

### Лабораторная работа № 3

#### Исследование Г-образного четырехполюсника

**Цель работы:** изучение методики исследования Г-образного четырехполюсника на переменном токе, режимов при изменении частоты питающего напряжения, режимов холостого хода и короткого замыкания со стороны входных и выходных зажимов.

## Порядок выполнения работы

1. Выбрать из комплекта элементов наборного поля катушку индуктивности  $L=5 \text{ мГн}$ , конденсатор  $C=1 \text{ мкФ}$ . Установить на переменной нагрузке начальное значение сопротивления  $300 \text{ Ом}$ .

2. Собрать на наборном поле цепь, представленную на рисунке 12. Регулируемый источник питания переменной частоты подключить к зажимам 1-1', сопротивление нагрузки подключить к зажимам 2-2'.

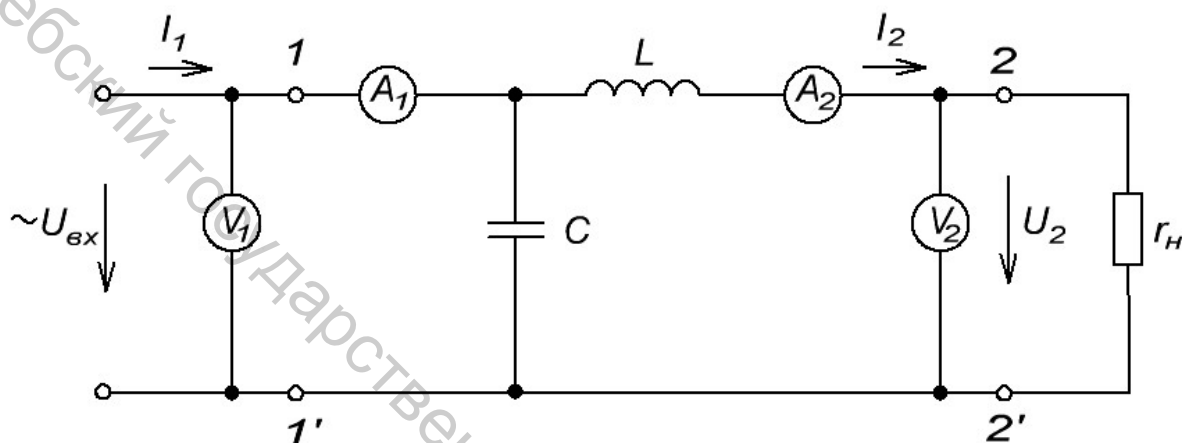


Рисунок 12 – Схема Г-образного четырехполюсника

3. Установить значение входного напряжения регулируемого источника  $10 \text{ В}$ , измерив напряжение вольтметром  $V_1$ . Данные занести в таблицу 3.

4. Изменяя частоту входного напряжения от  $0,5$  до  $8,5 \text{ кГц}$ , поддерживая при этом постоянную величину  $U_{вх}=10 \text{ В}$ , записать значения входного  $I_1$  и выходного токов  $I_2$ , напряжения на выходных зажимах 2-2'. Данные занести в таблицу 3.

5. Вычислить значение входного сопротивления  $R_{in}$ , входной  $P_1$  и выходной  $P_2$  мощностей, коэффициента передачи  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$ .

6. Провести опыт короткого замыкания со стороны выходных зажимов 2-2'. Определить параметры короткого замыкания: ток  $I_{2к}$  и напряжения  $U_2$ ; по их значениям определить сопротивление  $R_{2к}$ .

Таблица 3

| № п/п | $f$ ,<br>кГц | $U_1$ ,<br>В | $I_1$ ,<br>мА | $R_{in}$ ,<br>Ом | $P_1$ ,<br>мВт | $U_2$ ,<br>В | $I_2$ ,<br>мА | $P_2$ ,<br>мВт | $\eta$ |
|-------|--------------|--------------|---------------|------------------|----------------|--------------|---------------|----------------|--------|
| 1.    | 0,5          |              |               |                  |                |              |               |                |        |
| ...   | ...          |              |               |                  |                |              |               |                |        |
| 9.    | 8,5          |              |               |                  |                |              |               |                |        |

### Контрольные вопросы

1. Почему схема называется Г-образной.
2. Дайте определение принципа взаимности.
3. Объясните ход частотных зависимостей.

Витебский государственный технологический университет



## Литература

1. Кузнецов, Э. В. Электротехника и электроника: учебник и практикум для академического бакалавриата, для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям : в 3 т. Т. 1 : Электрические и магнитные цепи / Э. В. Кузнецов; под общ. ред. В. П. Лунина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Юрайт, 2019. – 255 с.
2. Рыбков, И. С. Электротехника: учебное пособие / И. С. Рыбаков. – Москва: РИОР : Инфра-М, 2013. – 160 с.
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии», «Электроэнергетика», «Приборостроение» / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., испр. и доп. – Москва: Гардарики, 2007. – 701 с.
4. Касаткин, А. С. Электротехника: учебник для студентов неэлектротехнических спец. вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 10-е изд., стер. – Москва: Академия, 2007. – 544 с.
5. Немцов, М. В. Электротехника и электроника: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки и спец. в области техники и технологии / М. В. Немцов. – Москва: Высшая школа, 2007. – 560 с.
6. Быстров, Ю. А. Электронные цепи и устройства / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. – Москва: Высшая школа 1989. – 287 с.
7. Электротехника: учебное пособие для студентов неэлектрических специальностей вузов / М. Ю. Анвельт [и др.]; под ред. В. С. Пантюшина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1976. – 560 с.
8. Общая электротехника: учебное пособие для студентов неэлектрических специальностей вузов / А. Т. Блажкин [и др.]; под ред. А. Т. Блажкина. – 4-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.
9. Борисов, Ю. М. Электротехника: учебник для студентов неэлектротехнических спец. вузов / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.

Учебное издание

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Составители:

Ильющенко Александр Васильевич

Куксевич Виталий Федорович

Редактор *Т.А. Осипова*

Корректор *Т.А. Осипова*

Компьютерная верстка *В.Ф. Куксевич*

---

Подписано к печати 03.12.2019. Формат 60x90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. листов 1,6.  
Уч.-изд. листов 1,9. Тираж 30 экз. Заказ № 345.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»  
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.