

В работе исследуются свойства электрических двухполюсников и четырехполюсников, составленных из линейных элементов. Вводятся понятия импеданса для двухполюсников и коэффициента передачи для четырехполюсников. Теоретические выводы подтверждаются соответствующими экспериментами.

Работа предназначена для студентов второго курса радиотехнического факультета.

Рис. 7.

Составитель И.А. Королев

Рецензент М.И. Бакунов

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского,
1992

Введение

Под двухполюсником понимается электрическая цепь, состоящая из произвольного числа элементов и имеющая два наружных контакта (или зажима), с помощью которых она подключается к другим цепям.

Четырехполюсник имеет уже четыре наружных зажима. Часто его назначение таково, что два зажима имеют смысл называть входными (как правило, к ним подключается источник энергии), а два других - выходными (с них снимается выходное напряжение). В дальнейшем при анализе двухполюсников и четырехполюсников предполагается, что энергия к ним подводится от идеального генератора напряжения (т.е. от генератора, внутреннее сопротивление которого равно нулю), а регистрирующие прибор имеет входное сопротивление $R_{вх} \rightarrow \infty$.

В настоящей работе мы ограничимся изучением линейных четырехполюсников, поведение которых описывается линейными дифференциальными уравнениями. На практике это означает, что они составлены из линейных элементов, имеющих линейную вольтамперную или аналогичные ей характеристики. В частности, такими элементами являются резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. Двухполюсники и четырехполюсники, содержащие электронные лампы и полупроводниковые приборы (т.е. элементы существенно нелинейные), здесь рассматриваться не будут.

Двухполюсники

В настоящей работе вам предлагается рассмотреть двухполюсники, приведенные на рис.1.

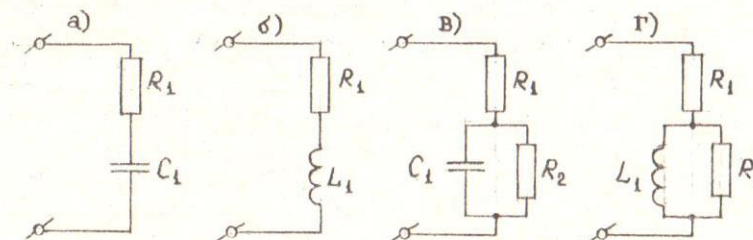


Рис.1

При подключении линейных двухполюсников к гармонической э.д.с. в них возникают гармонические напряжения и токи той же частоты, что и частота подключаемой э.д.с. Будем записывать их в виде

$$u = U e^{j(\omega t - \varphi_u)}; \quad i = I e^{j(\omega t - \varphi_i)}$$

Им соответствуют комплексные амплитуды

$$\dot{U} = U e^{-j\varphi_u}; \quad \dot{I} = I e^{-j\varphi_i}$$

Отношение

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \dot{Z} = \frac{U}{I} e^{j(\varphi_i - \varphi_u)} = Z e^{j\varphi},$$

имеющее размерность сопротивления, называют комплексным импедансом. Это основная характеристика двухполюсника.

Четырехполюсники

Важнейшей характеристикой четырехполюсника является коэффициент передачи, равный отношению комплексной амплитуды напряжения на выходе к комплексной амплитуде напряжения на входе:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{вх}} = K e^{j\varphi}.$$

Очевидно, что коэффициент передачи данного четырехполюсника зависит только от частоты. Модуль коэффициента передачи $K(\omega)$ часто называют амплитудной характеристикой четырехполюсника, а его аргумент $\varphi(\omega)$ — фазовой характеристикой.

Четырехполюсники могут применяться в самых различных случаях. Вот лишь некоторые из них: дифференцирование и интегрирование сигналов, изменение величины и полярности импульсов (импульсные трансформаторы), линии задержки, линейные формирующие цепи, фазовращатели.

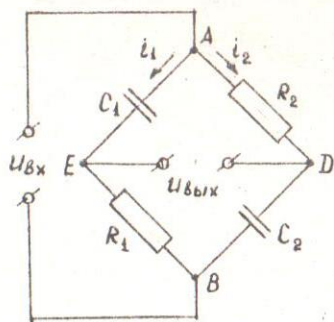


Рис. 2

На рис. 2 приведена схема так называемого мостового четырехполюсника, который может использоваться в качестве фазовращателя. В этой схеме $R_1 = R_2 = R$; $C_1 = C_2 = C$. Тогда токи i_1 и i_2 в ветвях схемы будут иметь одинаковые амплитуды и совпадать по фазе. Входное напряжение $U_{вх}$ подводится к одной диагонали моста (AB), а выходное снимается с другой диагонали (DE). Построим векторную диаграмму для этой схемы (рис. 3). Входное напряжение может быть представлено в

виде разности напряжений на C_2 и R_1 . Из полученной диаграммы следует, что напряжение на выходе по амплитуде равно напряжению на входе, а по фазе сдвинуто на угол φ , причем

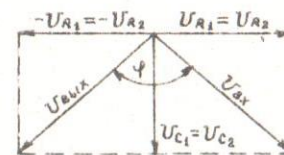


Рис. 3

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{U_R}{U_C} = \frac{IR}{I \frac{1}{\omega C}} = \omega RC,$$

Это соотношение показывает, что сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями может изменяться от нуля при $\omega RC \rightarrow 0$ до 180° при $\omega RC \rightarrow \infty$. Получить сдвиг фаз, в точности равный 180° , в такой схеме, очевидно, не удастся, т.к. ωRC всегда конечно.

Для получения сдвига фаз в 180° (и даже больше) можно использовать четырехполюсник, приведенный на рис. 4.

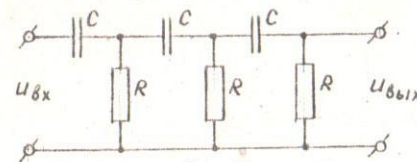


Рис. 4

Его коэффициент передачи можно подсчитать, используя любой из методов расчета электрических цепей. Не производя вычислений, приведем выражения для его амплитудной и фазовой характеристик:

$$K(\omega) = \frac{\Omega^3}{\sqrt{(1 - 6\Omega^2)^2 + \Omega^2(5 - \Omega^2)^2}};$$

$$\varphi(\omega) = \frac{3\pi}{2} - \arctg \frac{\Omega(5 - \Omega^2)}{1 - 6\Omega^2},$$

где $\Omega = \omega RC$ — безразмерная циклическая частота. Из этих выражений следует, что частота, при которой входное и выходное напряжения будут противофазны, равна

$$\omega = \frac{1}{RC\sqrt{6}}$$

и при этом модуль коэффициента передачи $K = \frac{1}{29}$, т.е. амплитуда напряжения на выходе в 29 раз меньше амплитуды входного напряжения. Изменяя величины R и C , можно в широких пределах менять частоту, для которой входное и выходное напряжения будут противофазны. Эти

частоты могут быть от долей герца до десятков мегагерц, при этом четырехполюсник будет в любом случае иметь достаточно малые габариты. Вместо конденсаторов можно, в принципе, использовать индуктивности, но габариты устройства в этом случае резко возрастут, особенно в области низких частот.

Существует ряд четырехполюсников, которые можно назвать "экаотическими". Не делая расчетов, свойства таких четырехполюсников предсказать трудно.

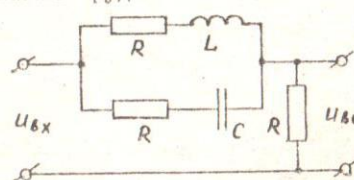


Рис.5

Элементы четырехполюсника, изображенного на рис.5, подчиняются условию:

$$L = \alpha R, \quad C = \frac{\alpha}{R},$$

где α - постоянная величина.

На рис.6 представлен четырехполюсник, который называют двойным Т-мостом.

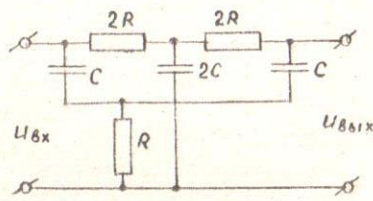


Рис.6

Описание экспериментальной установки

Установка для исследования двухполюсников и четырехполюсников собрана в одном корпусе. Она достаточно проста и в особых пояснениях не нуждается.

Для регистрации сигналов пригоден любой осциллограф, имеющий вход усилителя горизонтального отклонения ("вход X"), калиброванную развертку и калиброванный коэффициент усиления по вертикали.

В качестве источника входных сигналов можно использовать любой звуковой генератор. Для измерения напряжений пригодны любые вольтметры с входным сопротивлением не менее 1 МОм.

Задание

1. Для двухполюсников, изображенных на рис.1а,б,в,г, рассчитайте зависимости модуля импеданса Z и аргумента φ от частоты и постройте соответствующие графики (частоту на графиках удобно откла-

дывать в логарифмическом масштабе).

Для каждой схемы измерьте Z и φ при нескольких значениях частоты в диапазоне звукового генератора и нанесите полученные точки на расчетные кривые. Если экспериментальные точки не ложатся идеально на теоретические графики, поясните возможные причины расхождений.

2. Для схемы (рис.2) при максимальном значении сопротивлений $R = R_1 = R_2$ получите экспериментально кривую зависимости сдвига фаз между U_{BYX} и U_{BX} от частоты. Сравните эту кривую с теоретической.

При постоянном значении частоты постройте теоретические и экспериментальные кривые зависимости φ от R .

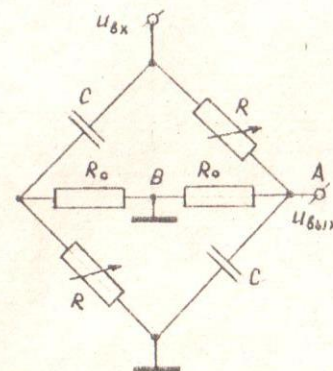


Рис.7

Выполняя эти задания, следует помнить, что у осциллографа одна из входных клемм усилителя горизонтального отклонения и усилителя вертикального отклонения соединена с корпусом прибора, поэтому непосредственное подключение входного и выходного напряжений к усилителям осциллографа непременно приведет к закорачиванию одного из плеч мостовой схемы. Чтобы этого не произошло, подключение схемы к осциллографу производится так, как показано на рис.7. Выходное напряжение снимается с резистора R_0 между точками А и В. При условии

$R_0 \gg R$ существенных изменений в работе схемы не произойдет.

3. Для четырехполюсника, изображенного на рис.4, снимите зависимость $\varphi(\omega)$. Определите, при какой частоте он будет равен $\frac{\pi}{2}$ и π .

4. Рассчитайте коэффициент передачи четырехполюсника, схема которого приведена на рис.5, при условии $L = \alpha R$, $C = \frac{\alpha}{R}$. Определите размерность α . Подтвердите свои вычисления экспериментом.

5. Попробуйте качественно представить зависимость модуля коэффициента передачи от частоты для четырехполюсника, схема которого изображена на рис.6. Снимите эту характеристику экспериментально.

Контрольные вопросы

1. Постройте векторные диаграммы токов и напряжений для двухполюсников, изображенных на рис.1. Поясните, как они будут изменяться при изменении частоты источника э.д.с.
2. Каким условиям должен удовлетворять источник входного сигнала и измерительные приборы, подключаемые к двухполюсникам и четырехполюсникам?
3. Поясните, почему в мостовой схеме, изображенной на рис.2, нельзя непосредственно использовать осциллограф для измерения сдвига фаз между $U_{вых}$ и $U_{вх}$, а в схемах, изображенных на рис.4, рис.5 и рис.6, это сделать можно.
4. Изобразите векторные диаграммы для мостового четырехполюсника (рис.2), если емкости в его плечах заменить индуктивностями.
5. Если на вход линейного четырехполюсника подать сигнал, который может быть представлен в виде суперпозиции отдельных гармонических составляющих, то как трансформируется спектр на выходе четырехполюсника? Что произойдет, если тот же сигнал подать на нелинейный четырехполюсник?

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ
И ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

(Описание к лабораторной работе)

Составитель: Игорь Яковлевич Королев

Подписано в печать 12.12.92 г. Формат 60×84 1/16.
Бумага оберточная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,5.
Тираж 500 экз. Заказ 14. Бесплатно.

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского.
Н. Новгород, пр. Гагарина, 23.
Типография ННГУ, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37.