**. ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ**

**1. Классификация**

|  |  |
| --- | --- |
|  ***Четырехполюсником*** называется некоторая электрическая цепь с двумя парами внешних зажимов, с помощью которых она взаимодействует с окружающей ее системой. Такое взаимодействие является двусторонним. С одной стороны, окружающая четырехполюсник цепь (система) влияет на его состояние, с другой – сам четырехполюсник определенным образом воздействует на работу всей внешней по отношению к нему цепи. При этом учет влияния системы на четырехполюсную цепь осуществляется включением в последнюю эквивалентного генератора со стороны одной пары зажимов (входных зажимов). А реакция внешней цепи на воздействие со стороны четырехполюсника учитывается подключением ко второй паре зажимов (выходных зажимов) эквивалентного сопротивления нагрузки. Согласно сказанному, схема включения четырехполюсника может быть представлена в виде, изображенном на рис. 3.1. | http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/DEPEN/ELMASH/T_L_E_C/METOD/IVANOVA/WEBUMK/frame/3.files/image002.gif  |

Четырехполюсники можно классифицировать как линейные и нелинейные, активные и пассивные, взаимные и невзаимные, симметричные и несимметричные, уравновешенные и неуравновешенные.

Понятие линейности уже введено.

Является ли четырехполюсник ***активным*** или ***пассивным*** зависит от того, содержит его схема источники энергии, или нет. В общем случае такие источники в схеме линейного четырехполюсника могут существовать, но при условии, что действие их взаимно компенсируется внутри самого четырехполюсника. Это означает, что при отключении четырехполюсника от внешней цепи напряжения на его входных и выходных зажимах равны нулю.

К ***взаимным*** относятся все ***линейные пассивные*** четырехполюсники как удовлетворяющие принципу взаимности (или обратимости). Соответственно активные четырехполюсники будут относиться к ***невзаимным*** (необратимым) цепям.

|  |  |
| --- | --- |
| К ***симметричным*** относятся такие четырехполюсники, у которых с помощью внешних измерений невозможно установить различие между входными и выходными зажимами. Это значит, что влияние такого четырехполюсника на всю систему не изменится, если пары входных и выходных зажимов поменять местами. Для того чтобы четырехполюсник был симметричным, его схема должна обладать симметрией относительно вертикальной оси http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/DEPEN/ELMASH/T_L_E_C/METOD/IVANOVA/WEBUMK/frame/3.files/image006.gif (рис. 3.2). Соответственно несимметричными называются четырехполюсники, не обладающие такими свойствами (например, невзаимные четырехполюсники).***Уравновешенными*** называются такие четырехполюсники, которые не меняют напряжения и токи во внешней цепи при «повороте» его относительно горизонтальной оси http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/DEPEN/ELMASH/T_L_E_C/METOD/IVANOVA/WEBUMK/frame/3.files/image008.gif (рис. 3.2), т. е. при взаимной замене зажимов 1–1’ и 2–2’. Чтобы четырехполюсник был уравновешенный, его схема должна обладать симметрией относительно указанной оси. В противном случае четырехполюсник является неуравновешенным. | http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/DEPEN/ELMASH/T_L_E_C/METOD/IVANOVA/WEBUMK/frame/3.files/image004.gif  |

**2. Уравнения передачи**

Анализ работы четырехполюсника как части сложной электрической цепи или как отдельного устройства в системе передачи электроэнергии сводится к изучению его свойств в целом, без детального анализа работы схемы самого четырехполюсника. Эти свойства полностью определяются соотношениями между напряжениями и токами на его входных и выходных зажимах: , , , . Уравнения, связывающие эти величины между собой в различной комбинации, называются уравнениями передачи четырехполюсника. При этом количество таких комбинаций определяется как число сочетаний из четырех по два, что составляет шесть возможных форм связи: . Для каждой формы уравнения передачи образуют систему двух линейных алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами. При этом сами коэффициенты называются ***первичными параметрами*** четырехполюсника. Коэффициенты, имеющие одноименные индексы, определяют входные параметры, а коэффициенты, при которых стоят разноименные индексы, определяют параметры передачи. Их значения зависят только лишь от структуры самого четырехполюсника и не меняются при изменении внешней по отношению к четырехполюснику цепи. В общем случае все величины являются комплексными числами.

Рассмотрим эти уравнения, заметив предварительно, что составлены они для токов и напряжений, положительные направления которых приняты так, как показано на рис. 3.3.

*а*   *б*  *в* 

Рис. 3.3. Условно-положительные направления токов и напряжений

1. Система уравнений с -***параметрами***. Эта форма связывает напряжения со стороны пар входных и выходных зажимов с токами, протекающими через эти зажимы, и записывается в виде

       или     .          (3.1)

Коэффициенты , ,  и  имеют размерность сопротивлений, поэтому матрицу , элементами которой они являются, называют ***матрицей сопротивлений***.  и  – входные сопротивления четырехполюсника со стороны зажимов 1–1’ и 2–2’ соответственно, а  и  определяют сопротивления передачи данного четырехполюсника при различном направлении прохождения сигнала.

2. Система уравнений с -***параметрами***. В этом случае устанавливается связь между токами, протекающими через первичные и вторичные зажимы, с напряжениями на этих зажимах, и записывается в виде

      или     .         (3.2)

Здесь коэффициенты , ,  и  имеют размерность проводимости, а матрицу , составленную из этих коэффициентов, называют ***матрицей проводимостей***. Элементы  и  определяют входную проводимость четырехполюсника со стороны зажимов 1–1’ и 2–2’ соответственно, а  и  – проводимость передачи.

3. Система уравнений с ***-параметрами***. В этом случае определяется напряжение со стороны входных зажимов  и ток на выходных зажимах  через известные значения  и . Система имеет вид

     или     .         (3.3)

Эта форма параметров принадлежит к так называемым смешанным параметрам, поскольку каждый из элементов , ,  и  матрицы  имеет свою размерность:  – сопротивление,  и  – безразмерные параметры,  – проводимость.

4. Система уравнений с ***-параметрами.*** Они связывают ток на входе четырехполюсника  и напряжение на его выходе  с известными значениями  и . Система имеет вид:

     или     .         (3.4)

Это также смешанная форма параметров, а элементы , ,  и  матрицы  имеют следующую размерность:  – проводимость,  и  – безразмерные величины,  – сопротивление.

В соответствии с принятыми положительными направлениями токов и напряжений (рис. 3.3, *б*) для взаимных несимметричных четырехполюсников между рассмотренными в пп. 1–4 параметрами передачи существуют следующие соотношения: , , , . Это значит, что ***взаимный несимметричный четырехполюсник полностью характеризуется тремя независимыми параметрами: двумя входными и одним параметром передачи***. Если же взаимный четырехполюсник обладает симметрией, то кроме того, выполняются равенства: , , , . В этом случае четырехполюсник может быть охарактеризован двумя независимыми параметрами: одним входным и одним параметром передачи.

Выбор указанных положительных направлений токов и напряжений целесообразен, если рассматривать четырехполюсник как часть сложной электрической цепи. Если же четырехполюсник выступает в качестве отдельного звена в тракте передачи сигнала от входных зажимов к выходным, то за положительные целесообразно принять токи и напряжения, показанные на рис. 3.3, *б*. Наиболее распространенная с точки зрения практического применения форма уравнений передачи в этом случае есть -форма.

5. Система уравнений с -***параметрами.*** В этом случае напряжение  и ток  на входных зажимах определяются через напряжение  и ток  со стороны выходных зажимов. Система имеет вид

      или     .         (3.5)

Элементы , , ,  матрицы  имеют следующую размерность:  – безразмерная величина;  – сопротивление;  – проводимость;  – безразмерная величина. Для взаимного несимметричного четырехполюсника в этом случае выполняется равенство . При наличии симметрии четырехполюсника .

6. Система уравнений с -***параметрами***. Здесь напряжение  и ток  со стороны выходных зажимов  определяются через напряжение  и ток  на входных зажимах. При этом за положительные приняты направления токов и напряжений, указанные на рис. 3.3, *в*. Система имеет вид

       или     .         (3.6)

Элементы , , ,  матрицы  имеют размерность:  –безразмерная величина;  – сопротивление;  – проводимость;
 – безразмерная величина.

Данная форма параметров является полным аналогом -пара­ме­тров, с той лишь разницей, что сигнал передается в обратном направлении, т. е. от зажимов 2–2’ к зажимам 1–1’. Следовательно, использовать ее целесообразно также в случае, когда четырехполюсник рассматривается как отдельное звено в тракте передаче сигнала.

Все приведенные формы уравнений абсолютно равноправны. Они связывают амплитуды и фазы гармонических сигналов на внешних зажимах четырехполюсника и, следовательно, полностью определяют как свойства самого четырехполюсника, так и его взаимодействие с внешними цепями.

*Электри́ческий фильтр*

        электрическое устройство, в котором из [Спектр](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/170510/%D0%A1%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80)аподанных на его вход электрических колебаний выделяются (пропускаются на выход) составляющие, расположенные в заданной области частот, и не пропускаются все остальные составляющие. Э. ф. используются в системах многоканальной связи (См. [Многоканальная связь](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/109857/%D0%9C%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F))*,* радиоустройствах, устройствах автоматики, телемеханики, радиоизмерительной техники и т. д. — везде, где передаются электрические сигналы при наличии других (мешающих) сигналов и шумов, отличающихся от первых по частотному составу; они применяются также в выпрямителях тока (См. [Выпрямитель тока](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/76644/%D0%92%D1%8B%D0%BF%D1%80%D1%8F%D0%BC%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C)) для сглаживания пульсаций выпрямленного тока. Область частот, в которой лежат составляющие, пропускаемые (задерживаемые) Э. ф., называют полосой пропускания (полосой задерживания). Фильтрующие свойства Э. ф. количественно определяются относительной величиной вносимого им затухания в составляющие спектра электрических колебаний: чем больше различие затуханий в полосе задерживания и полосе пропускания, тем сильнее выражены его фильтрующие свойства. По виду кривой зависимости затухания от частоты (по взаимному расположению полос пропускания и задерживания) различают Э. ф.: нижних частот (ФНЧ), пропускающие колебания с частотами не выше некоторой граничной *f*в и задерживающие колебания с частотами выше *f*в*,* верхних частот (ФВЧ), в которых, наоборот, пропускаются колебания с частотами выше некоторой *f*ни подавляются колебания ниже этой границы; полосно-пропускающие (ППФ), или полосовые, выделяющие колебания только в конечном интервале частот от *f*в до *f*н*,* полосно-задерживающие (ПЗФ), иначе режекторные фильтры, обратные ППФ по своим частотным характеристикам.

         Конструкция Э. ф., технология их изготовления, а также принцип действия определяются прежде всего рабочим диапазоном частот и требуемым видом частотной характеристики. В диапазоне от единиц *кгц* до десятков *Мгц* (в отдельных случаях — до единиц *Ггц*) получили распространение *LC*-фильтры (***рис. 1***, а, б, г), содержащие дискретные элементы — катушки индуктивности и электрические конденсаторы; в диапазоне от долей *гц* до сотен *кгц* наиболее часто используют пассивные или активные *RC*-фильтры (***рис. 1***, б), выполненные на основе резисторов и конденсаторов (активный, кроме того, содержит [Усилитель электрических колебаний](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/143302/%D0%A3%D1%81%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C)). Действие *LC-* и *RC*-фильтров основано на использовании зависимости сопротивления реактивного (См. [Сопротивление реактивное](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/134487/%D0%A1%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5))(ёмкостного и индуктивного) от частоты переменного тока. Для фильтрации сигналов, частота которых составляет доли *гц,* служат электротепловые фильтры (ЭТФ), конструктивно представляющие собой стержень с источником тепла и термоэлектрическим преобразователем; введение в ЭТФ усилителей с обратной связью (См. [Обратная связь](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/115242/%D0%9E%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BD%D0%B0%D1%8F)) позволяет реализовать электротепловые ФВЧ и ППФ. Известны также электромеханические фильтры, выполненные на основе дисковых, цилиндрических, пластинчатых, гантельных и камертонных [Резонатор](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/126847/%D0%A0%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80)ов. В таких Э ф используется явление механического резонанса; применяются в диапазоне от нескольких *кгц* до 1 *Мгц*. Высокими фильтрующими свойствами обладают пьезоэлектрические ППФ и ПЗФ, материалом для изготовления которых служит [Пьезокварц](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/125302/%D0%9F%D1%8C%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%86) или [Пьезоэлектрическая керамика](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/125305/%D0%9F%D1%8C%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F) (см. также [Пьезоэлектричество](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/125309/%D0%9F%D1%8C%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE)). Таковы, например, пьезокварцевые фильтры на дискретных элементах — кварцевых резонаторах в сочетании с катушками индуктивности и конденсаторами; монолитные многорезонаторные пьезокварцевые фильтры. Связь между резонаторами в последних осуществляется посредством акустических волн — объёмных (для фильтров, применяемых в диапазоне частот от нескольких *Мгц* до десятков *Мгц*) либо поверхностных (в диапазоне от нескольких *Мгц* до 1—2 *Ггц*). Особую группу Э. ф. составляют цифровые фильтры (***рис. 2***), часто выполняемые на *интегральных схемах.* В *сверхвысоких частот технике* Э. ф. реализуют на основе отрезков линий передачи (*коаксиальных кабелей,* полосковых линий (См. [Полосковая линия](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/122270/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F)), металлических [Радиоволновод](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/125710/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4)ов и др.), являющихся по существу распределёнными колебательными системами (См. [Колебательные системы](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/96792/%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B1%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5))*.* В диапазоне 100 *Мгц —* 10 *Ггц* применяют гребенчатые, шпилечные, встречно-стержневые, ступенчатые и др. Э. ф. из полосковых резонаторов (***рис. 3***). В диапазоне от нескольких *Ггц* до нескольких десятков *Ггц* распространены волноводные Э. ф., представляющие собой волноводную секцию с повышенной критической частотой (волноводный ФВЧ), либо секцию, содержащую резонансные диафрагмы или объёмные резонаторы (См. [Объёмный резонатор](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/115463/%D0%9E%D0%B1%D1%8A%D1%91%D0%BC%D0%BD%D1%8B%D0%B9)) (волноводный ППФ).

        

        Рис. 1. Принципиальные схемы некоторых электрических фильтров на катушках индуктивности, конденсаторах и резисторах — нижних частот (а), верхних частот (б), полосно-пропускающего (в), полосно-задерживающего (г) и их частотные характеристики (соответственно д, е, ж, з): L1, L2,..., Ln — катушки индуктивности; C1, С2 ,...,Сп — конденсаторы; R1, R2, Rn — резисторы; f — частота; fн, fв — граничные частоты.