линий передачи волновых возмущений любой природы (см., напр., *Импеданс акустический*).

Импеданс двухполюсника. В теории электрич. цепей любую часть цепи, состоящую из пассивных линейных элементов (таких, как сопротивления r, индуктивности L, ёмкости C, трансформаторы) и имеющую две точки (полюса) подключения к остальной цепи (рис. 1), в случае квазистационарных гармонич. процессов с зависимостью от времени $\sim\exp(i\omega t)$ можно рассматривать как пассивный двухполюсник, все внеш. свойства к-рого описываются одной комплексной величиной Z, наз. И. двухполюсника и равной

$$Z(\omega)=V/I=R(\omega)+iX(\omega).$$

Здесь V — комплексная амплитуда напряжения между полюсами 1 и 2, I — комплексная амплитуда тока в на-

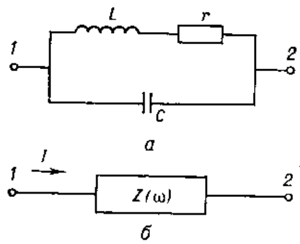

Рис. 1. Электрическая цепь, включающая пассивные линейные элементы и имеющая два полюса: *а* — схема цепи; *б* — эквивалентный двухполюсник с импедансом $Z(\omega)$.

правлении от полюса 1 к полюсу 2; R — веществ. часть импеданса (а к т и в н о е с о п р о т и в л е н и е), X — мнимая часть И. (р е а к т и в н о е с о п р о т и в л е н и е, р е а к т а н с). Модуль И. $|Z|=(R^2+X^2)^{1/2}$ наз. п о л н ы м с о п р о т и в л е н и е м двухполюсника. В СИ И. измеряется в Омах, в *Гаусса системе единиц* имеет размерность, обратную скорости. Иногда наряду с И. Z используют обратную ему величину $\sigma=Z^{-1}$, наз. а д м и т а н с о м.

Активное сопротивление R ответственно за потери энергии, поступающей в двухполюсник. Мощность потерь P (средняя за период колебаний $T=2\pi/\omega$) выражается соотношением

$$P=R\,|I|^2/2.$$

Реактанс характеризует величину энергии, пульсирующей с частотой 2ω (и потому в среднем за период равной нулю), накапливаемой в двухполюснике и отдаваемой обратно источнику. Знак реактанса определяется зависимостью от времени: в технике и прикладной физике (и в данной статье) полагают её $\sim\exp(i\omega t)$, в теоретич. физике обычно принимают $\sim\exp(-i\omega t)$.

В случае чисто индуктивного двухполюсника (*индуктивное сопротивление*) $X=X_L=\omega L$ (в СИ; в системе единиц Гаусса $X_L=c^{-2}\omega L$), а для чисто ёмкостного (*ёмкостное сопротивление*) $X=X_C=-(\omega C)^{-1}$. Различие в знаках порождается дуальной асимметрией *Максвелла уравнений* ($\boldsymbol{E}\rightarrow\boldsymbol{H}$, $\boldsymbol{H}\rightarrow-\boldsymbol{E}$) и отражает соотношение между фазами напряжений и токов: ток в идеальной катушке самоиндукции отстаёт по фазе на $\pi/2$ от приложенного напряжения, а ток через идеальный конденсатор опережает на тот же угол напряжение, создаваемое на его обкладках. Правила сложения И. при последоват. и параллельном их соединении такие же, как и в случае обычных омических сопротивлений: при последоват. соединении двухполюсников складываются И. Z, а при параллельном — адмитансы Z^{-1}. Напр., для двухполюсника, изображённого на рис. 1*а*, имеем:

$$Z^{-1}=(r+i\omega L)^{-1}+i\omega C.$$

Матрица импеданса. Разветвлённую электрич. цепь, имеющую более двух точек подключения, наз. многополюсником [если число пар точек подключения (входов) равно N, то цепь наз. $2N$-полюсником]. На входах многополюсника должны быть заданы направления отсчёта напряжений и токов (рис. 2). Если многополюсник включает в себя только линейные, пассивные и взаимные элементы, то для квазистационарных гармонич. процессов все его внеш. свойства описываются матрицей импеданса $\|Z_{\alpha\beta}\|$, связывающей комплексные амплитуды напряжений и токов на входах при произвольном подключении к когерентным источникам:

$$V_\alpha=\sum_{\beta=1}^{N}Z_{\alpha\beta}I_\beta,\quad \alpha=1,\ 2,\ \ldots,\ N.$$

Напр., для четырёхполюсника, изображённого на рис. 3, *а*, элементы матрицы И. равны: $Z_{11}=Z_1+Z_3$, $Z_{22}=Z_2+Z_3$, $Z_{12}=Z_{21}=Z_3$. В силу *взаимности принципа* матрица $\|Z_{\alpha\beta}\|$ симметрична, т. е. $Z_{\alpha\beta}=Z_{\beta\alpha}$.

Входной импеданс. Свойства многополюсников можно описать и с помощью т. н. в х о д н ы х И. отд. входов. При этом по отношению к выбранному входу многопо-

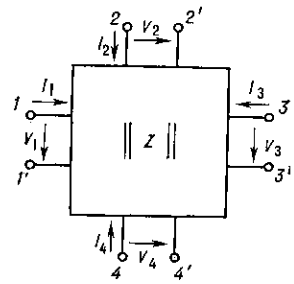

Рис. 2. Многополюсник, все внешние свойства которого задаются матрицей импеданса $\|Z\|$.

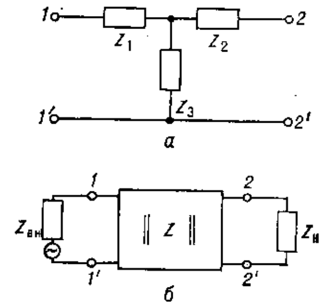

Рис. 3. Четырёхполюсник: *а* — эквивалентная схема; *б* — схема для определения входного импеданса.

люсник рассматривают как двухполюсник, а все остальные входы считают нагруженными произвольными И. $Z_{н\beta}$. Поэтому входные И. являются ф-циями не только частоты, но и н а г р у з о ч н ы х И. Так, для четырёхполюсника, приведённого на рис. 3:

$$Z_{вх1}=Z_{11}-\frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{22}+Z_{н2}}\,.$$

Для согласования произвольной нагрузки $Z_н$ с источником, имеющим в н у т р. И. $Z_{вн}$, используют недиссипативные четырёхполюсники (без поглощающих элементов), добиваясь выполнения условия $Z_{вх}(Z_н)=Z^*_{вн}$ (* означает комплексное сопряжение). При этом достигается макс. передача энергии от источника к нагрузке (кпд равен 50%, остальная энергия поглощается внутри источника). Если требуется обеспечить высокий кпд передачи, выбирают такой согласующий четырёхполюсник, чтобы выполнялись условия: $R_{вх}(Z_н)\gg R_{вн}$, $X_{вх}(Z_н)=-X_{вн}$.

Волновой импеданс. Входной И. четырёхполюсника, удовлетворяющий условию $Z_{вх}(Z_н=Z_в)=Z_н=Z_в$, наз. в о л н о в ы м импедансом, ибо в бесконечной цепочке, составленной из одинаковых четырёхполюсников, будут без отражений распространяться волны (в общем случае экспоненциально затухающие) с пост. значением отношения напряжения к току. В пределе непрерывной однородной линии передачи это отношение в любом нормальном сечении постоянно и при отсутствии потерь равно $Z_в=(L_п/C_п)^{1/2}$, где $L_п$, $C_п$ — погонные (на единицу длины) индуктивность и ёмкость линии.

Для линии конечной длины, нагруженной на $Z_н\neq\neq Z_в$, коэф. отражения (отношение комплексных амплитуд отражённой и падающей волн) равен

$$\Gamma=(Z_н-Z_в)/(Z_н+Z_в). \qquad (1)$$

При $Z_н=0$ и $Z_н\rightarrow\infty$, что соответствует короткозамкнутой и разомкнутой линиям, имеет место полное отражение ($\Gamma=\mp1$). Длинные линии не являются квазистационарными системами, поэтому понятие напряжения является условным. Обычно его относят только к точкам, лежащим в одном нормальном сечении линии S_n, а путь