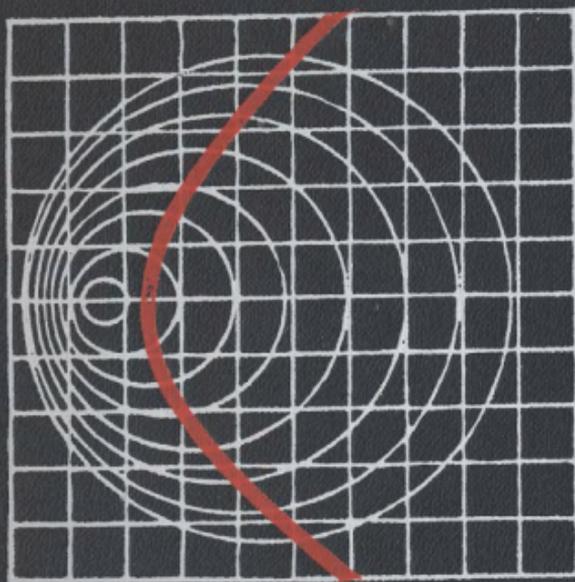


ШУМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

И. В. СУХОДОЕВ



*Шумы*

ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ЦЕПЕЙ

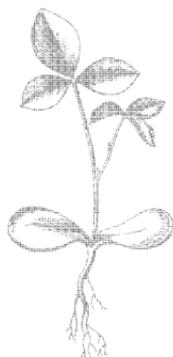
И. В. СУХОДОЕВ

# ШУМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

(Теория)



ИЗДАТЕЛЬСТВО «СВЯЗЬ»  
МОСКВА 1975



Scan AAW

6Ф0.1

С91

УДК 621.372.061 + 621.391.82

**Суходоев И. В.**

С91 Шумы электрических цепей. (Теория.) М.,  
«Связь», 1975.

352 с. с ил.

В книге излагается теория собственных шумов линейных электрических цепей. Рассматриваются причины их возникновения и способы оценки. Анализируются шумы двухполюсников и четырехполюсников, сложных соединений и систем передачи. Определяются условия оптимизации по критерию шумозащищенности и влияние несогласованности.

Книга предназначена для научных работников и инженеров, занимающихся исследованием шумовых свойств электрических цепей, проектированием аппаратуры связи, высокочувствительных радиотехнических устройств и низкошумящих электронных приборов.

С  $\frac{30401-070}{045(01)-75}$  14-74

6Ф0.1

С  $\frac{30401-070}{045(01)-75}$  14-74

© Издательство «Связь», 1975 г.

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $a$  — параметр четырехполюсника, затухание (усиление)  
 $b$  — параметр четырехполюсника, коэффициент фазы, индекс, вносимая величина  
 $B$  — реактивная проводимость  
 $B_c$  — емкостная проводимость  
 $B_L$  — индуктивная проводимость  
 $\delta$  — индекс, действующее значение  
 $c$  — индекс, сигнал, собственная (характеристическая), постоянная величина  
 $C$  — емкость  
 $\dot{e}$  — комплексное задающее напряжение  
 $e$  — среднеквадратическое значение задающего напряжения, заряд электрона ( $1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл)  
 $\overline{|e_{ш}|^2}$  — средний квадрат задающего напряжения шума  
 $f$  — параметр четырехполюсника, частота колебаний  
 $F$  — коэффициент шума  
 $F_{опт}$  — оптимальный коэффициент шума  
 $F_{мин}$  — минимальный коэффициент шума  
 $G$  — активная проводимость  
 $G_{ш}$  — эквивалентная проводимость шума  
 $h$  — параметр четырехполюсника  
 $\dot{I}$  — комплексный ток  
 $I$  — постоянный ток, среднеквадратическое значение тока  
 $\overline{|I_{ш}|^2}$  — средний квадрат шумового тока  
 $i$  — комплексный задающий ток, среднеквадратическое значение задающего тока  
 $\overline{|i_{ш}|^2}$  — средний квадрат задающего шумового тока  
 $K_I$  — коэффициент передачи по току  
 $K_P$  — коэффициент передачи по мощности  
 $K_U$  — коэффициент передачи по напряжению  
 $k$  — постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град)  
 $l$  — длина линии  
 $\mu$  — индекс, оконечный элемент в соединении  
 $L$  — индуктивность  
 $M$  — мера шума  
 $n$  — коэффициент трансформации  
 $n$  — индекс, номинальный, независимый  
 $N$  — относительная температура шума  
 $\xi$  — защищенность от шумов  
 $P_a$  — активная мощность  
 $P_s$  — полная (кажущаяся) мощность  
 $\rho$  — коэффициент отражения, уровень (дБ), индекс

- $(p)$  — индекс, результирующее значение  
 $s$  — индекс, промежуточный элемент соединения  
 $R$  — активное сопротивление  
 $R_{ш}$  — эквивалентное сопротивление шума  
 $T$  — абсолютная температура  
 $T_0$  — нормальная температура (290°K)  
 $T_{ш}$  — эквивалентная температура шума  
 $\dot{U}$  — комплексное напряжение  
 $U$  — постоянное напряжение, среднеквадратическое значение напряжения  
 $\overline{|U_{ш}|^2}$  — средний квадрат напряжения шума  
 $X$  — емкостное сопротивление  
 $X_C$  — реактивное сопротивление  
 $X_L$  — индуктивное сопротивление  
 $Y$  — комплексная проводимость  
 $|Y|$  — полная проводимость (модуль комплексной проводимости)  
 $y$  — параметр четырехполюсника  
 $Z$  — комплексное сопротивление  
 $|Z|$  — полное сопротивление (модуль комплексного сопротивления)  
 $Z_0$  — сопротивление короткого замыкания  
 $Z_\infty$  — сопротивление холостого хода  
 $z$  — параметр четырехполюсника  
 $\gamma$  — коэффициент корреляции, коэффициент распространения  
 $\Delta$  — определитель системы уравнений  
 $\Delta f$  — ширина полосы частот (спектра)  
 $\omega$  — угловая частота  
 $2$  и  $0$  — индексы, прямая, обратная и нулевая последовательность

*Памяти  
матери моей  
Валентины Александровны Рябинской  
посвящается*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Внедрение микроэлектроники в устройства электро-связи и радиотехническое оборудование влечет за собой значительное увеличение количества используемых в них полупроводниковых приборов. Происходит это не только по причине ограниченных возможностей микрокомпонентов, но и вследствие все более широкого применения аналогов пассивных элементов. Последние заменяют обычные трансформаторы и катушки, не реализуемые методами микроэлектроники, а также традиционные резисторы и конденсаторы.

Возрастание общего числа источников шума в устройствах на микросхемах осложняет проблему шумозащищенности, которая и без того всегда отличалась сложностью в разрешении. Эта проблема занимает центральное место при передаче информации на дальние расстояния. Собственные шумы определяют чувствительность радиоприемных устройств и тем самым влияют на дальность радиосвязи; в системах многоканальной проводной связи с учетом их определяются расстояние между промежуточными усилителями и предельная протяженность магистралей.

В общем виде взаимосвязь шумозащищенности и пропускной способности средств обработки и передачи сообщений раскрывает теория информации. Согласно известной формуле Шеннона максимальное количество информации  $C_{\text{макс}} = \Delta f \lg_2 (1 + P_c/p_{\text{ш}})$ , которое может быть передано по каналу, определяется полосой пропускания  $\Delta f$  и отношением сигнал/шум. Увеличить его, следовательно, без расширения полосы можно путем повышения  $P_c$  — мощности сигнала и за счет снижения  $p_{\text{ш}}$  — мощности шумов с равномерным спектром.

Энергетические возможности интегральных микросхем не позволяют рассчитывать на существенное повышение мощности передачи, поэтому при их использовании снижение уровня помех, в том числе собственных шумов средств обработки и передачи информации, приобретает особенно важное значение.

Причины возникновения собственных шумов кроются в физических явлениях и процессах, протекающих в электрических цепях. Во всех, без исключения, реальных элементах имеются источники шумов, интенсивность которых зависит от многих факторов. В совокупности эти источники определяют влияние внутренних шумов на сигнал, оцениваемое непосредственно отношением сигнал/шум или по его изменению — коэффициентом шума.

Наименьшего влияния собственных шумов на сигнал в системе можно добиться предельно снизив интенсивность флуктуаций в элементах и обеспечив наиболее благоприятный режим работы электрической цепи — минимизировав коэффициент шума. Предлагаемая работа в основном ориентирована на последнее направление и вопросы, сопутствующие ему. Приведенные вначале краткие сведения об источниках шума имеют вспомогательное значение и используются для перехода от флуктуационных явлений и процессов в отдельных элементах к обобщающим положениям теории шумящих цепей.

В свою очередь, вопросы теории и расчета шумов, как можно легко установить, теснейшим образом переплетаются с решением задач, составляющих предмет изучения общей теории электрических цепей. Эта органическая взаимосвязь и вытекающее из нее неременное условие совместимости методов анализа и синтеза, способов выражения шумовых и сигнальных свойств электрических цепей, предопределили содержание работы. Предполагается, что читатель знаком с основными положениями общей теории электрических цепей или же достаточно подготовлен и может воспользоваться для справок приведенными в перечне литературы источниками.

Анализ шумов электрических цепей занимает центральное место и составляет большую часть объема предлагаемой работы. Вопросы синтеза цепей по критерию шумозащищенности представлены в постановочном плане и сводятся к получению минимального коэффициента

шума путем реализации заданного по сопротивлению источника сигнала.

По главам материал располагается согласно принципу — от простого к сложному и от общего к частному — в пределах каждого раздела. Такая композиция обладает, по крайней мере, двумя достоинствами — предельно облегчает восприятие материала и придает ему наибольшую компактность. По ходу изложения в обобщенном виде выводятся основные соотношения, частные случаи, за некоторыми исключениями, в тексте не приводятся. В виде готовых формул они представлены в таблицы, что упрощает пользование материалом при решении конкретных задач.

При разработке теоретических вопросов и в решениях типовых задач принимались во внимание тенденции развития микроэлектроники и особенности микроминиатюризации аппаратуры, базирующейся на применении интегральных схем, аналогов пассивных элементов и цепей с распределенными параметрами.

Воплощение основного замысла потребовало теоретической разработки значительного круга вопросов (для восполнения пробелов) и обобщения многочисленных публикаций в плане достижения необходимой совместимости теории шумящих и сигнальных цепей. При этом принимались во внимание известные особенности электросвязи и радиотехники, что предопределило, в частности, использование термина «шумы». Понятие «флуктуации» сохраняет смысл промежуточной «инстанции» между физическими процессами и их внешними проявлениями — «шумами».

Ограниченный объем работы, к сожалению, не позволил осветить целый ряд вопросов, например, касающихся особенностей анализа шумов при помощи топологических методов, и вынудил довольствоваться ссылками на отдельные работы. По той же причине в книгу не включены вопросы расчета шумов, а в перечень литературы включены лишь публикации, на которые имеются указания в тексте.

В заключение автор считает приятным долгом выразить свою признательность и глубокую благодарность доктору технических наук профессору Э. В. Зеляху за постоянное внимание к его теоретическим изысканиям, ценные замечания и советы по ним, во многом способствовавшие формированию предлагаемой работы; доктору технических наук профессору Е. П. Дементьеву за

неоднократное плодотворное обсуждение основных положений теории шумящих цепей, просмотр рукописи и высказанные по ней критические замечания; заслуженному деятелю науки и техники, доктору технических наук профессору В. Н. Листову за неоценимую поддержку и внимание к его исследованиям, замечания по рукописи.

Основные разделы работы в виде отдельных тем докладывались автором на научных сессиях и ежегодных конференциях Научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова; по секции теории электрических цепей, руководимой доктором технических наук профессором А. Ф. Белецким, и секции многоканальных систем связи, руководимой заслуженным деятелем науки и техники, кандидатом технических наук Г. Г. Бородзюком. Автор выражает глубокую признательность руководителям секций и всем, принимавшим участие в обсуждении его сообщений и докладов.

Все высказанные советы и замечания самым внимательным образом были рассмотрены автором и в той или иной мере нашли отражение в работе, что несомненно способствовало ее улучшению.

В памяти автора живет чувство безмерной благодарности своему учителю, ныне покойному доктору технических наук Константину Петровичу Егорову, чье благотворное влияние во многом стимулировало проведение исследований по шумам.

Автор глубоко признателен товарищам по совместной работе за внимание и неоднократное обсуждение результатов его работы, сотрудникам за неоценимую помощь в выполнении расчетов и оформлении рукописи.

Автор заранее благодарен читателям, которые сочтут необходимым высказать свои замечания по книге.

Отзывы и пожелания следует направлять по адресу: 101000, Москва-центр, Чистопрудный бульвар, 2, издательство «Связь».

## ШУМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

### 1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ШУМОВ

**С**обственные шумы элементов электрических цепей в зависимости от спектральных характеристик и внешнего сходства порождающих их флуктуационных процессов подразделяются на тепловые, дробовые и мерцательные [10, 15, 17, 54, 61, 114]. Такая классификация, хотя и условна, но способствует достижению общности в оценке шумовых свойств элементов и упрощает определение их влияния на отношение сигнал/шум.

Тепловой шум возникает в результате хаотического движения свободных электронов в проводниках, зависит от температуры и сопротивления. В полупроводниковых материалах он появляется вследствие случайного характера процессов диффузии, приводящих к образованию локализованных флуктуаций плотностей носителей. Близки по природе тепловому шуму и спонтанные изменения скоростей генерации, рекомбинации и улавливания, в результате которых возникают флуктуации плотностей свободных носителей.

Дробовой шум обязан своим происхождением дискретной природе носителей тока и возникает под воздействием электрического поля. В электронных лампах дробовой шум связан с нерегулярностью последовательного вылета электронов с катода. Флуктуации скорости диффузии являются основной составляющей дробового шума в полупроводниковых приборах с электронно-дырочными переходами<sup>1)</sup>. В транзисторах большим сходством с дробовым шумом обладают также случайные изменения скоростей генерации и рекомбинации носителей.

Мерцательный шум, в отличие от теплового и дробового, имеет специфичную частотную зависимость вида  $1/f$ . Возникновение его обычно связывают с медленными флуктуациями сопротивлений. В электронных

---

<sup>1)</sup> В последующем именуемыми просто переходами.

лампах мерцательный шум объясняют непостоянством работы вылета электронов с различных точек катода, флуктуациями проводимости поверхностного слоя и воздействием на электронный ток испаряющихся с катода ионизированных молекул. При протекании постоянного тока через полупроводник изменяется его проводимость, возникают модуляционные процессы, явления утечки и случайные колебания плотностей носителей тока, которые приводят к появлению мерцательного шума.

В приведенную классификацию не входят некоторые виды шумов, вызываемых явлениями, отличными от рассмотренных:

**шум токораспределения, возникающий** в многоэлектродных приборах, вследствие статистического распределения электронного тока между отдельными электродами, как это имеет место, например, в много-сеточных лампах;

**ионный шум**, появляющийся вследствие ионизации практически неустраняемого остаточного газа в электронных лампах,— при столкновении электронов с его молекулами возникают флуктуации электронного тока;

**магнитный шум**, возникающий в магнитных материалах с неоднородной структурой,— при намагничивании отдельных частиц появляются случайные отклонения скорости намагничивания, поэтому в условиях переменного намагничивания и размагничивания появляются флуктуации плотности магнитного потока. Пронизывая катушку, такой поток наводит в ней шумовое напряжение.

Таковы основные разновидности внутренних шумов элементов электрических цепей. К настоящему времени далеко не полностью изучены порождающие их явления, созданные теоретические модели флуктуационных процессов в полупроводниках весьма приближенны. Однако они позволяют с приемлемой для практических целей точностью придерживаться приведенной классификации и руководствоваться ею при рассмотрении шумовых свойств элементов электрических цепей.

## **1.2. ШУМЫ РЕЗИСТОРОВ, КАТУШЕК И КОНДЕНСАТОРОВ**

По характеру преобладающих флуктуаций резисторы делятся на две группы. В первую входят металлические (проволочные) резисторы, шумы которых обуславливаются преимущественно тепловыми процессами. По-

этому шумовое напряжение на разомкнутых выводах резистора сопротивлением  $R$  определяется по известной формуле [17, 69, 70, 76]:

$$\overline{|e_{\text{шт}}|^2} = 4 k T R \Delta f. \quad (1.1)$$

Вторую, наиболее обширную, группу составляют углеродистые, металлизированные, композиционные и другие типы резисторов, шумы которых наряду с тепловыми процессами обусловлены и рядом других явлений. При этом интенсивность шумов нетеплового происхождения зависит в них от приложенного напряжения, протекающего тока, а также в известной мере определяется конструктивно-технологическими факторами [57, 59]. Повышенные шумы непроволочных резисторов обусловлены структурными особенностями применяемого для их изготовления проводящего материала<sup>1)</sup>. При протекании тока через резисторы с зернистой структурой сопротивление их из-за непостоянства контактной проводимости между отдельными частицами меняется по случайному закону.

Результирующее напряжение шумов непроволочных резисторов при отсутствии корреляции между источниками флуктуаций  $\overline{|e_{\text{шт}}^{(p)}|^2} = \overline{|e_{\text{шт}}|^2} + \overline{|e_{\text{шн}}|^2}$  учитывает избыточные шумы, определяемые эмпирическим выражением

$$\overline{|e_{\text{шн}}|^2} = 4 k T c R \Delta f I^\alpha, \quad (1.2)$$

где  $I$  — протекающий через резистор ток;  $c$  — постоянная для данного типа резистора величина;  $\alpha$  — колеблется в пределах 1,8—2,2.

Наибольшая интенсивность шумов непроволочных резисторов наблюдается в диапазоне до 1000 Гц и зависит от частоты, в низкочастотной области она изменяется по закону  $1/f$ , характерному для мерцательного шума. Избыточный шум зависит также от размеров и мощности рассеивания непроволочного резистора — маломощные элементы обладают худшими шумовыми характеристиками. По величине токовых шумов особенно выделяются композиционные резисторы (десятки микровольт на вольт), за ними следуют углеродистые, металлооксидные и металлопленочные (несколько мик-

<sup>1)</sup> Вследствие зависимости от тока шумы в них иногда называют токовыми.

ровольт на вольт), приближающиеся по интенсивности шума к проволочным резисторам.

Ухудшение шумовых свойств резисторов иногда происходит по причине плохих контактов между выводами и токопроводящим материалом. В этом случае шумы могут возрасти более чем на порядок. Резкое повышение шумов вызывают и межвитковые замыкания в проволочных резисторах, а также трещины и неоднородности в проводящем материале непроволочных резисторов.

В переменных резисторах имеют место дополнительные шумы, вызываемые несовершенством подвижного контакта. Они возникают не только при движении контакта (шумы вращения), но и при фиксированном его положении.

Чисто реактивные составляющие — идеальные индуктивности, емкости — бесшумны и могли бы в цепи играть лишь роль накопителей энергии. Реальные катушки и конденсаторы обладают комплексными сопротивлениями (проводимостями). Индуктивности и емкости их всегда выступают в соединении с активными составляющими, обусловленными, в частности, потерями. Последние преимущественно и являются источниками шума, интенсивность которых зависит от добротности, определяемой сопротивлением потерь катушки или проводимостью конденсатора.

В катушках с магнитопроводом потери возникают в обмотке и сердечнике, причем в случае значительного преобладания тепловых процессов шумы определяются согласно (1.1)

$$\overline{|e_{\text{шг}}|^2} = 4kT \int_{f_1}^{f_2} R(f) df \quad \text{или} \quad \overline{|i_{\text{шг}}|^2} = 4kT \int_{f_1}^{f_2} G(f) df, \quad (1.3)$$

где  $R(f)$  и  $G(f)$  — усредненное сопротивление и проводимость.

В пределах достаточно узкой полосы частот сопротивление и проводимость определяются на средней частоте  $f_0$ , тогда

$$\overline{|e_{\text{шг}}|^2} = 4kTR(f_0)\Delta f \quad \text{или} \quad \overline{|i_{\text{шг}}|^2} = 4kTG(f_0)\Delta f. \quad (1.4)$$

Недоброкачественные электрические контакты между наружными выводами и обкладками конденсатора или проводом обмотки также приводят к возникновению дополнительных мерцательных шумов.

Рассмотренные типы резисторов на высоких частотах выступают в виде комплексных проводимостей и сопро-

тивлений (за счет индуктивностей выводов и паразитных емкостей), тогда в (1.1)—(1.4) вместо  $R$  и  $G$  подставляются соответственно  $\text{Re}Z$  и  $\text{Re}Y$ .

Из (1.1)—(1.4) следует, что напряжение теплового шума в полосе частот от 0 до  $\infty$  бесконечно велико. Но это противоречит действительному положению вещей, поэтому следует иметь в виду, что в области очень высоких частот классическая статистическая механика становится неприменимой и шумовые соотношения поэтому требуют пересмотра на базе квантовой теории. Приведенные выражения справедливы до частот порядка  $6 \cdot 10^{12}$  Гц [15, 54].

С освоением методов микроэлектроники стали широко применяться аналоги резисторов, катушек, трансформаторов и конденсаторов, получаемые методами интегральной технологии на полупроводниковой основе [1, 81, 82]. Процессы возникновения шумов в них более сложны, изложенное выше относится лишь к традиционным пассивным элементам.

### 1.3. ШУМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

В электронных лампах существует несколько источников флуктуаций, но наиболее значимы из них — порождающие мерцательный и дробовой шум [17, 20, 27, 57, 74].

Мерцательный шум возникает в результате непрерывного изменения электронной эмиссии катода, диффузии и других причин. Изменение эмиссии в лампах происходит со сравнительно низкой частотой, верхняя граница которой составляет примерно 500 Гц, и приводит к возникновению мерцательных шумов. В области низких звуковых частот интенсивность их может в несколько раз превышать дробовые шумы. Мерцательные шумы особенно заметны в лампах с оксидными катодами и, в отличие от дробовых, поддаются ослаблению тщательной обработкой катодов.

Дробовой шум порождается электронной эмиссией накаленного катода. В результате возникают непрерывные флуктуации тока лампы, которые образуют два вида дробовых шумов: анодного тока и наведенных в цепи сетки.

Дробовой шум анодного тока связан со случайным характером электронной эмиссии, а в многоэлектронных

лампах он обусловлен случайным характером перераспределения тока, например, между анодом и экранной сеткой в пентоде. Шумы перераспределения наводятся в цепи управляющей сетки и увеличивают флуктуации анодного тока. Дробовой шум анодного тока достигает наибольшей интенсивности при ограничении тока лампы температурой катода, когда напряжение на аноде достаточно велико для того, чтобы собирать все эмиттированные электроны (режим насыщения).

В этом случае дробовой шум анодного тока диода, триода с отрицательным смещением или любой другой лампы, в которой весь катодный ток направляется к одному электроду, определяется выражением

$$\overline{|i_{шд}|^2} = 2 e I_0 \Delta f, \quad (1.5)$$

где  $I_0$  — постоянная составляющая анодного тока.

Выражение (1.5) справедливо до частот, на которых становится существенным время пролета электронов.

В ненасыщенном режиме ток лампы определяется напряжением на аноде и образующийся пространственный заряд значительно уменьшает влияние флуктуаций катодной эмиссии на анодный ток. В этом режиме на частотах, позволяющих пренебречь временем пролета электронов, дробовой шум анодного тока

$$\overline{|i_{шд}|^2} = 0,644 \cdot 4k T_k G_i \Delta f, \quad (1.6)$$

где  $T_k$  — абсолютная температура катода;  $G_i$  — внутренняя проводимость диода.

Для триода с отрицательным смещением при отсутствии насыщения дробовой шум анодного тока

$$\overline{|i_{шд}|^2} = 0,644 \cdot 4k T_k \Delta f S / \sigma, \quad (1.7)$$

где  $S$  — крутизна анодного тока;  $\sigma$  — конструктивная постоянная лампы (равная 0,5÷1,0).

Дробовые шумы в многоэлектронных лампах обладают большей интенсивностью, чем в триодах с отрицательным смещением. Это вызывается перераспределением полного катодного тока между электродами. Наведенные дробовые шумы возникают в цепи управляющей сетки при пересечении плоскости последней летящими к аноду электронами. Они наводят в ней ток: положительный — при приближении и отрицательный — при удалении. Дробовые флуктуации катодного тока вследствие этого будут вызывать флуктуации наводимого в сетке тока. Вследствие конечного времени пролета электронов

в лампе, наводимый в сетке шумовой ток линейно возрастает с частотой

$$\overline{i_{шн}}^2 = 0,644 \cdot 4kT_k \Delta f \omega^2 S/\sigma. \quad (1.8)$$

Выражения (1.7) и (1.8) справедливы также для смесительных ламп, если вместо  $S$  в них подставить  $S_{ср}$  — среднюю крутизну за один период колебания напряжения гетеродина. На высоких частотах наведенные шумы могут превышать дробовые.

Шумы вторичной эмиссии возникают при ударах об электроды электронов и ионов. При достаточно высокой скорости они выбивают из них один или несколько электронов. Вторичную эмиссию составляют электроны, эмиттированные поверхностью только при бомбардировке ее другими носителями заряда. Для чистых металлов число выбиваемых электронов в зависимости от скорости может трехкратно превосходить количество первичных, для поверхностей из сложных щелочно-земельных элементов — десятикратно.

Флуктуации эмиссии вторичных электронов создают шумовой ток лампы подобно флуктуациям термоэлектронной эмиссии накаливаемого катода. Если при этом не образуется пространственного заряда, как, например, в фотоэлектронных умножителях и других приборах, использующих вторичную эмиссию для усиления тока, то шумовой ток вторично эмиттирующего электрода

$$\overline{i_{шв}}^2 = 2eI_v \Delta f, \quad (1.9)$$

где  $I_v$  — постоянная составляющая тока вторичной эмиссии.

С учетом усиления тока эмиттирующим электродом, определяемого отношением среднего числа вторичных и первичных электронов, полный шумовой ток вторичной эмиссии

$$\overline{i_{шв}^{(p)}}^2 = \overline{i_{шп}}^2 K_I^2 + 2eI_n \Delta f K_I, \quad (1.10)$$

где  $i_{шп}$  — шумовой ток первичных электронов;  $I_n$  — среднее значение тока первичных электронов;  $K_I$  — усиление тока эмиттирующим электродом.

Ионный шум возникает вследствие того, что движущиеся от катода к аноду с определенной скоростью электроны при столкновении ионизируют остаточные молекулы газа. Освобождаемые при этом носители устремляются к аноду, а ионы, образующиеся из молекул газа при потере электронов, улавливаются управляю-

щей сеткой. Во внешней цепи возникает поток электронов, движущихся к сетке для нейтрализации ионов, который создает на сеточном сопротивлении положительное падение напряжения. Столкновения электронов и молекул газа носят случайный характер, поэтому анодный и сеточный токи, возникающие вследствие этих столкновений, становятся дополнительными источниками шума. Интенсивность их зависит от количества ионов, определяемых током лампы и числом оставшихся в ней молекул газа. Поскольку ионы собираются сеткой, величину шума, возникающего при их образовании, связывают со средним током сетки. Шумовая составляющая анодного тока, обусловленная ионными шумами, равна

$$|\overline{i_{\text{ша}}}|^2 = 4kT \Delta f I_c (20 R_c^2 + 4 \cdot 10^4 I_a / S^3) S^2, \quad (1.11)$$

где  $R_c$  — активное сопротивление во внешней цепи сетки;  $I_a$  — постоянная составляющая анодного тока;  $I_c$  — постоянная составляющая сеточного ионного тока;  $S$  — крутизна лампы по управляющей сетке.

Источники шума создают суммарные шумовые токи

$$|\overline{i_{\text{шс}}^{(p)}}|^2 = \sum_{s=1}^{\mu} |\overline{i_{\text{шс}}^{(s)}}|^2 \quad \text{или} \quad |\overline{e_{\text{шс}}^{(p)}}|^2 = \sum_{s=1}^{\mu} |\overline{e_{\text{шс}}^{(s)}}|^2, \quad (1.12)$$

$$|\overline{i_{\text{ша}}^{(p)}}|^2 = \sum_{s=1}^{\mu} |\overline{i_{\text{ша}}^{(s)}}|^2 \quad \text{или} \quad |\overline{e_{\text{ша}}^{(p)}}|^2 = \sum_{s=1}^{\mu} |\overline{e_{\text{ша}}^{(s)}}|^2. \quad (1.13)$$

Обычно корреляцию между слагаемыми в (1.12) и (1.13) не принимают во внимание, но она учитывается в общем случае между сеточными и анодными шумовыми составляющими [17, 26, 52].

#### 1.4. ШУМЫ ПЛОСКОСТНЫХ ДИОДОВ

Исследования флуктуаций в чистых полупроводниках — германии, кремнии и точечных приборах — позволили выяснить возможные причины возникновения шумов в плоскостных диодах. В свою очередь, изучение флуктуации последних послужило основанием для предположения, что мерцательный, дробовой и тепловой шу-

мы присущи также другим полупроводниковым элементам, в том числе многоэлектродным. Соотношения между составляющими шума в них неодинаковы и зависят от ряда обстоятельств. Существенную роль играет структура полупроводникового материала — монокристаллы обладают лучшими шумовыми характеристиками в сравнении с поликристаллическими структурами [16, 31, 54].

Мерцательный шум порождается несколькими источниками флуктуаций с различной интенсивностью, среди которых выделяются поверхностный шум и шум утечки.

Поверхностный шум возникает при образовании снаружи полупроводника двух энергетических уровней, так называемых «медленных» и «быстрых» состояний. Первые действуют преимущественно как ловушки для основных носителей, вторые выступают в роли центров рекомбинации для неосновных.

При процессах улавливания и рекомбинации возникают флуктуации в объеме материала полупроводника и на его поверхности, которые создают шумовой ток через электронно-дырочный переход

$$|\overline{i_{\text{шн}}}|^2 = cs^{\beta-2} I f^{-\alpha} \Delta f, \quad (1.14)$$

где  $c$  — коэффициент, учитывающий особенности наружного слоя полупроводникового материала;  $s$  — скорость поверхностной рекомбинации;  $\beta$  — показатель, представляющий «медленные» функции плотности тока;  $I$  — протекающий через переход ток;  $\alpha$  — показатель, учитывающий свойства перехода.

Шум утечки создается спонтанными флуктуациями проводимости тонкой проводящей пленки, образующейся по периметру перехода для германиевых диодов

$$|\overline{i_{\text{шy}}}|^2 = 2e I_{\text{дн}} \Delta f, \quad (1.15)$$

где  $I_{\text{дн}}$  — ток насыщенного диода (эквивалентного по утечке), пропорциональный квадрату тока утечки через переход.

Ток утечки резко падает с уменьшением напряжения на переходе, поэтому вызываемые им шумы незначительны при отрицательном смещении, близком к нулю. Шумовой ток утечки, представляя функцию обратного напряжения, обладает своего рода гистерезисом и с повышением температуры увеличивается.

Составляющие мерцательного шума, порождаемые так называемыми канальными эффектами, возникают

при образовании поверхностного слоя с проводимостью, обратной основному материалу полупроводника. При отрицательном смещении перехода на долю канального обратного тока приходится значительная часть мерцательного шума.

Шумовая схема замещения полупроводникового диода для низких частот, отображающая расположение основных источников, представлена на рис. 1.1а. На ней

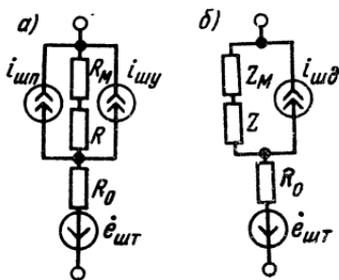


Рис. 1.1. Схемы замещения полупроводникового диода, учитывающие шумы:

- а) мерцательные и тепловые,  
б) дробовые и тепловые

представлена на рис. 1.1а. На ней источники поверхностного шума  $i_{шт}$  и утечки  $i_{шд}$  включены параллельно сопротивлениям  $R$  и  $R_M$ , соединенным последовательно. Величина  $R$  характеризует внутреннее сопротивление диода,  $R_M$  учитывает модуляционные эффекты, а  $R_0$  — сопротивление по постоянному току. Порождаемые им тепловые шумы учитываются источником  $e_{шт}$ .

Дробовой шум плоскостных диодов, исследовавший-ся двумя различными методами, которые дали практически одинаковые результаты, не получил единого общепризнанного объяснения. При коллективном методе он приписывается случайной диффузии неосновных носителей, а также произвольной генерации — рекомбинации электронно-дырочных пар; при корпускулярном методе происхождение дробового шума основывается на предположении случайности и независимости пересечения перехода отдельными носителями.

Дробовой шум диода в области низких частот образуется двумя составляющими:

$$|\overline{i_{шд}}|^2 = 2e(I + I_0)\Delta f - 2e(-I_0)\Delta f, \quad (1.16)$$

где  $I + I_0$ ;  $-I_0$  — токи через переход в прямом и обратном направлениях.

Встречные токи порождают независимые составляющие дробового шума. Приложенное к диоду напряжение суммируется с контактной разностью потенциалов  $U_d$ , поэтому полное напряжение между областями  $p$  и  $n$  равно  $U - U_d$ . Вероятность диффузии дырок, вызывающих ток из области  $n$  в область  $p$ , не зависит от  $U$ ; диффузия же дырок, образующих ток из области  $p$  в  $n$ , про-

порциональна величине  $\exp[-e(U_d - U)/kT]$ . Эти токи имеют встречное направление и равновелики при нулевом смещении перехода.

Дробовой шум диода в области высоких частот

$$|\overline{i_{шд}}|^2 = 4kTG\Delta f - 2eI\Delta f, \quad (1.17)$$

где  $G$  — вещественная составляющая полной проводимости перехода;  $I$  — ток через переход, положительный при прямом и отрицательный при обратном смещениях.

Тепловой шум, в отличие от других видов, обнаруживается и в обесточенном диоде.

При выяснении причин возникновения дробового шума предполагалось, что непосредственно к переходу приложено напряжение  $U - U_d$ . В действительности оно меньше, часть этого напряжения теряется на контактных сопротивлениях и прилегающих к переходу областях материала. Это учитывается в схеме замещения диода последовательно включенным сопротивлением  $R_0$  (рис. 1.1), величина которого зависит от протекающего через диод тока. Возникающий в нем тепловой шум определяется по известной формуле:

$$|\overline{e_{шт}}|^2 = 4kTR_0\Delta f. \quad (1.18)$$

Интенсивность теплового шума по имеющимся данным почти на порядок ниже, чем у дробовых шумов.

Шумовая схема замещения полупроводникового диода для высоких частот представлена на рис. 1.1б. Дробовые шумы учитываются источником  $i_{шд}$ , который включен параллельно сопротивлениям  $Z$  и  $Z_m$ , соединенным между собой последовательно. Величина  $Z$  характеризует сопротивление перехода, а  $Z_m$  учитывает влияние модуляционных эффектов.

Все выше изложенное следует рассматривать в свете исходных условий и предположений, которые дополняются еще некоторыми ограничениями: результаты проверялись для температур, близких к нормальной, при невысоких уровнях инжекции и при отсутствии влияния ловушек в переходной области.

С некоторыми оговорками механизм возникновения шумов в плоскостных диодах может быть применен также и к точечным.

## 1.5. ШУМЫ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Биполярные германиевые и кремниевые транзисторы получили широкое применение и лишь с переходом на

методы микроэлектроники они стали заметно вытесняться униполярными [16, 101]. В зависимости от типа проводимости основной массы полупроводника биполярные транзисторы делятся на две группы — *p-n-p* и *n-p-n*.

Представив транзистор в виде двух взаимодействующих диодов (эмиттер — основание, коллектор — основание), один из которых находится в открытом состоянии, а другой в закрытом, распространим на него механизм возникновения шумов в полупроводниковых диодах, учитывая по мере необходимости особенности их взаимодействия. В соответствии с этим в транзисторах рассматриваются мерцательные, дробовые и тепловые шумы, к которым добавляются шумы токораспределения [13, 65, 83, 92, 104, 111].

Мерцательный шум в транзисторах приписывается поверхностным процессам и явлениям утечки. Он учитывается соответствующими источниками в схеме замещения транзистора (рис. 1.2а). Флуктуации заполнения

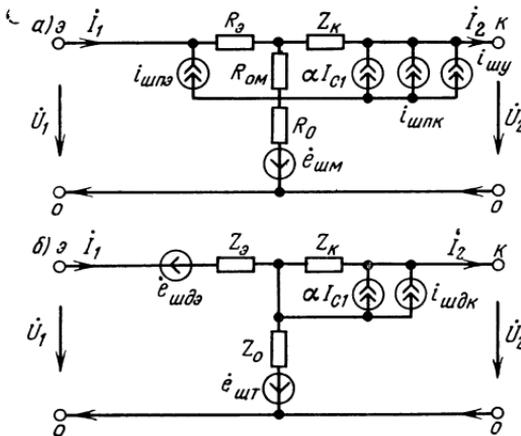


Рис. 1.2. Схемы замещения биполярного транзистора, учитывающие шумы:  
а) мерцательные и тепловые, б) дробовые и тепловые

медленных поверхностных состояний в области основания порождают шумы, учитываемые двумя коррелированными источниками —  $i_{шпэ}$  и  $i_{шпк}$ , — включенными параллельно эмиттерному и коллекторному переходам.

Непосредственная модуляция сопротивления основания  $R_0$ , вызванная теми же причинами, учитывается ис-

точником шумового напряжения  $e_{\text{шм}}$ . Косвенная модуляция источниками шумового тока учитывается включением источника  $i_{\text{шпэ}}$  параллельно  $R_{\text{э}}$  и  $R_{\text{ом}}$ , а источника  $i_{\text{шпк}}—Z_{\text{к}}$  и  $R_{\text{ом}}$ .

Шумовой ток утечки на схеме замещения представлен источником  $i_{\text{шу}}$ . При незначительной модуляции сопротивления основания этот источник подключается параллельно  $Z_{\text{к}}$ . При смещениях  $|U_{\text{к}}| \leq 10$  В в транзисторах с тщательно обработанной поверхностью шумовой ток утечки пренебрежимо мал.

Между шумовыми источниками  $e_{\text{шм}}$  и  $i_{\text{шпэ}}$ ,  $i_{\text{шпк}}$  также существует корреляционная связь, незначительная при слабо выраженных модуляционных явлениях и малом токе утечки.

Область нижних частот, в которой наиболее проявляется мерцательный шум, по данным исследований на нитях из германия, простирается примерно до  $2,5 \times 10^{-4}$  Гц, а верхняя граница, по измерениям в современных транзисторах, — до  $0,7 \div 3,0$  кГц. На более высоких частотах мерцательный шум незначителен и маскируется шумами иного происхождения. При повышенной влажности и недостаточно тщательной обработке поверхности полупроводникового материала мерцательный шум может оставаться значительным до частот 100 кГц и выше подобно тому, как это имело место, например, в образцах транзисторов первых выпусков.

Вследствие некоторых особенностей поверхностных флуктуаций уровень мерцательного шума транзисторов типа  $p-n-p$  значительно ниже, чем у приборов с  $n-p-n$ -переходами. Установлено также, что германиевые транзисторы обладают лучшими шумовыми характеристиками по сравнению с кремниевыми.

Дробовой шум транзисторов имеет ту же природу, что и в полупроводниковых диодах. Выражение (1.16) обычно используется для определения дробового шума транзистора при предположении независимости составляющих  $I+I_0$  и  $-I_0$ . В соответствии с этим дробовой шум эмиттерного перехода

$$|\overline{i_{\text{шдэ}}}|^2 = 2e(I_{\text{э}} + I_{\text{э}0})\Delta f - 2e(-I_{\text{э}0})\Delta f, \quad (1.19)$$

где  $I+I_{\text{э}0}$  — протекающий из эмиттера в основание ток, образуемый движением дырок;  $-I_{\text{э}0}$  — протекающий из основания в эмиттер ток, вызываемый движением генерируемых в основании дырок.

Через коллекторный переход все дырки движутся в одном направлении, поэтому ток дробового шума

$$\overline{i_{шдк}^2} = 2eI_K \Delta f. \quad (1.20)$$

Выражения дробового шума эмиттерного и коллекторного переходов полностью совпадают с (1.16), если соответственно  $I=I_E$  и  $I_0=I_{E0}$ ,  $I=I_K$  и  $I_0=I_{K0}$ . При обратном смещении перехода  $I_K+I_{K0}=0$ . Значения  $I_{E0}$  и  $I_{K0}$ , если пренебречь токами утечки, примерно равны токам эмиттера и коллектора при достаточно больших смещениях перехода. Выражения (1.19) и (1.20) справедливы и для случая, когда часть тока создается основными носителями.

На высоких частотах поток носителей не совпадает по фазе с приложенным напряжением, что приводит к частотной зависимости проводимости и появлению емкостной составляющей. В этом случае дробовые шумы эмиттерного перехода транзистора определяются как

$$\overline{i_{шдэ}^2} = 4kTG_E \Delta f - 2eI_E \Delta f, \quad (1.21)$$

а коллекторного согласно (1.20).

На схеме замещения (рис. 1.2б) они учитываются коррелированными источниками шума  $e_{шдэ}$  и  $i_{шдк}$ . На низких частотах корреляция между ними обычно пренебрежимо мала, в области высоких она может быть весьма значительной.

Тепловой шум в транзисторах приписывается активным сопротивлениям на границе между внешними электродами и объемом полупроводника. Эти сопротивления имеют распределенную структуру, причем сопротивления эмиттера и коллектора заметно уступают по величине сопротивлению основания  $R_0$ . Поэтому учитываются только тепловые шумы последнего, в соответствии с чем

$$\overline{e_{што}^2} = 4kTR_0 \Delta f. \quad (1.22)$$

Германиевые транзисторы имеют меньшее сопротивление основания, чем кремниевые, поэтому тепловые шумы последних выше.

При протекании через переход переменного тока изменяется скорость инжекции, рекомбинации и выхода носителей, вследствие этого возникают модуляционные составляющие, учитываемые при необходимости в полном сопротивлении основания транзистора.

Кроме рассмотренных выше источников, иногда учитываются шумы разделения тока эмиттера на токи основания и коллектора. Замечено повышение шумов при облучении полупроводника быстрыми частицами (шумы облучения) и при смещении перехода напряжением, близким к пробивному (шумы лавинного пробоя). Имеются сведения о кратковременных «вспышках» шумов в некоторых образцах низкошумящих приборов и указания на ряд других явлений, сопровождаемых повышением шумов в транзисторах [16, 111].

## 1.6. ШУМЫ УНИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

В отличие от биполярных транзисторов, в которых доминируют дробовые шумы генерационно-рекомбинационных процессов, в униполярных транзисторах преобладают тепловые флуктуации, а на низких частотах преобладает мерцательный шум [77, 103].

Мерцательный шум в различных типах полевых транзисторов проявляется по-разному. В приборах с  $p-n$  управляемым переходом граница его может простираться до 1 кГц и выше, в зависимости от качества транзистора, величины токов утечки и других факторов. Предполагают, что главной причиной мерцательного шума в кремниевых полевых транзисторах с управляющим  $p-n$ -переходом являются флуктуации заряда генерационно-рекомбинационных центров в переходной области.

В отличие от полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом, МОП-транзистор управляется поверхностно, процессы управления протекают на границе изолятор—полупроводник. В области раздела часто наблюдается высокая концентрация поверхностных состояний. Некристаллическая структура изолятора и встречающиеся дефекты способны вызвать обмен зарядами с полупроводником. Все это приводит к возникновению мерцательного шума в МОП-транзисторах.

В полевых транзисторах с управляющим  $p-n$ -переходом на частотах ниже 100 Гц мерцательный шум превосходит тепловой, но особенно он значителен в транзисторах с изолированным затвором и превышает тепловой даже на частотах в несколько мегагерц. Возможности снижения его пока остаются невыясненными.

Тепловой шум в полевых транзисторах возникает в сопротивлении канала и паразитном сопротивлении истока и стока. Тепловые флуктуации сопротивления ка-

нала в результате процессов управления транзистором вызывают на выходе его шум, отличающийся от исходного. Для полевых транзисторов МОП-структуры при пренебрежимо малом паразитном последовательном сопротивлении шумовой ток на выходе

$$|\overline{i_{шц}}|^2 = 4 k T \Delta f S_{зн} \varphi_1(\eta), \quad (1.23)$$

где  $S_{зн}$  — крутизна при насыщении;  $\varphi_1(\eta)$  — функция, принимающая значения от 0,6 до 1;  $\eta$  — относительное напряжение стока.

В случае насыщения  $\eta=1$  и (1.23) принимает вид

$$|\overline{i_{шц}}|^2 = (2/3)4kT \Delta f S_{зн}; \quad (1.24)$$

при  $\eta > 1$  оно неприменимо, хотя экспериментальные данные указывают на незначительность погрешности; при  $U_c=0$

$$|\overline{i_{шц}}|^2 = 4 k T \Delta f G_{с0}; \quad (1.25)$$

при  $U_c=U_3=0$

$$|\overline{i_{шц}}|^2 = 4 k T \Delta f G_{с00}, \quad (1.26)$$

где  $G_{с0}$  — стоковая проводимость при  $U_c=0$ ;  $G_{с00}$  — та же величина при  $U_c=U_3=0$ ; но при этом условии необходимо исключить тепловой шум несмещенного канала.

Тепловые флуктуации в канале имеют емкостную связь с цепью затвора и влияют на величину  $i_{шз}$ , поэтому оба тока коррелированы.

В полевом транзисторе с изолированным затвором тепловые шумы определяются выражениями: при  $\eta=1$

$$|\overline{i_{шз}}|^2 = 0,12 \cdot 4 k T \Delta f \omega^2 C_3^2 / S_{зн}; \quad (1.27)$$

при  $U_c=0$

$$|\overline{i_{шз}}|^2 = 0,12 \cdot 4 k T \Delta f \omega^2 G_3^2 / G_{с0}; \quad (1.28)$$

при  $U_c=U_3=0$

$$|\overline{i_{шз}}|^2 = 0,12 \cdot 4 k T \Delta f \omega^2 C_3^2 / G_{с00}, \quad (1.29)$$

где  $C_3$  — емкость затвор-канал.

При минимизации шумов следует иметь в виду, что в униполярных транзисторах наименьший коэффициент шума достигается при сопротивлении источника сигнала,

превышающем 10 000 Ом, а в биполярных транзисторах, наоборот, при величинах, обычно не превышающих 10 000 Ом.

Весьма примечательным является и то обстоятельство, что интенсивность входного шума кремниевых биполярных транзисторов и униполярных с управляющим *p-n*-переходом на частоте в 1 кГц примерно на два порядка ниже, чем у кремниевых транзисторов с изолированным затвором.

Полевые транзисторы обладают в сравнении с биполярными преимуществами технологической совместности с интегральными структурами, что повышает процент выхода последних и позволяет достигать высоких плотностей упаковки. Кроме того, полевые транзисторы обладают свойствами, позволяющими использовать их в качестве регулируемых сопротивлений, элементов памяти и т. д.

Униполярные транзисторы пока еще не нашли широкого применения в цепях с дискретными элементами, но применение их представляется весьма многообещающим. Благоприятствует этому высокое входное сопротивление (иногда совершенно необходимое), двусторонняя симметрия проводимости, низкие шумы транзисторов с управляемым *p-n*-переходом. Отчасти этими достоинствами можно объяснить неуклонно возрастающий выпуск МОП интегральных узлов. Шумы утечки в МОП-транзисторах незначительны, благодаря высокому сопротивлению изолятора ток утечки затвора пренебрежимо мал.

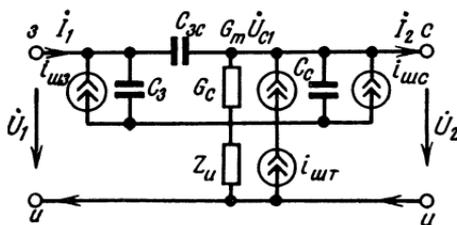


Рис. 1.3. Схема замещения униполярного транзистора, учитывающая источники шума

На рис. 1.3 представлена шумовая схема замещения полевого транзистора. Основной составляющей источника  $i_{шс}$  являются тепловые флуктуации в канале, а  $i_{шз}$  — связанные с входной цепью флуктуации заряда в нем

дробовой шум тока утечки затвора и мерцательный шум. Паразитное последовательное сопротивление  $R_3$  служит дополнительным источником шума  $i_{шз}$ .

### 1.7. ШУМЫ ПРОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наряду с рассмотренными, наиболее широко применяемыми в радиотехнических устройствах и установках электросвязи, встречаются менее распространенные приборы, используемые для защиты основных цепей от перенапряжений, стабилизации источников питания, коммутации и т. д. Эти элементы также обладают внутренними шумами, которыми не всегда можно пренебречь. Флуктуации ряда элементов используются в качестве первичных источников в генераторах шума [95, 98]. Не останавливаясь на последних, как находящихся вне круга рассматриваемых вопросов, охарактеризуем особенности шумов приборов, применяемых для решения некоторых специфичных технических задач.

*Туннельные диоды*, отличающиеся от обычных полупроводниковых диодов наличием падающего участка вольтамперной характеристики (областью отрицательного сопротивления), обладают флуктуациями слабой интенсивности. Порождаемые ими шумы относятся к категории тепловых и дробовых, причем последние преобладают [16, 73]. Тепловые шумы туннельного диода обязаны своим возникновением последовательному сопротивлению потерь

$$\overline{|e_{шт}|^2} = 4kTR_n \Delta f, \quad (1.30)$$

где  $R_n$  — сопротивление потерь в материале полупроводника и выводах.

Дробовые шумы определяются приближенным выражением

$$\overline{|i_{шд}|^2} = 4kTR_n/R_d^2 \Delta f + 2eI_0 df, \quad (1.31)$$

где  $I_0$  — протекающий через диод постоянный ток;  $R_d$  — сопротивление диода.

*Фотопроводники* на основе сульфида кадмия содержат наряду с дробовыми и тепловыми составляющими слабые компоненты мерцательных шумов [16, 52]. При световом смещении с  $\lambda > 5100\text{Å}$  спектр шумов их имеет одинаковую зависимость с квадратом частотной характеристики до 1 кГц и описывается выражением вида  $\text{const}/(\omega^2\tau^2 + 1)$ , при этом  $\tau$  изменяется в пределах

$1-10^{-2}$  с в зависимости от интенсивности света (световые смещения с  $\lambda < 5100\text{Å}$  и  $\lambda > 5100\text{Å}$  различно влияют на шум). В этой области он имеет характер фотоиндуцированного шума. На высоких частотах шум имеет довольно ровный спектр, что объясняется характером флуктуаций скорости захвата электронов ловушками, которые не влияют на частотные свойства элемента.

При световом смещении с  $\lambda < 5100\text{Å}$  вследствие сильного поглощения возникает большое количество электронно-дырочных пар и дырки полностью захватываются ловушками. Спектральная плотность шума в этом случае совпадает с квадратом частотной характеристики до 10 кГц, а затем обе изменяются по закону  $f^{-2}$ . В области низких частот она не вписывается в зависимость вида  $\text{const}/(\omega^2\tau^2 + 1)$ , поэтому вводят несколько постоянных времени  $\tau$  с наименьшей величиной  $3 \cdot 10^{-4}$  с, которая связана с переходами между зоной проводимости и активаторными уровнями.

*Линейные полупроводниковые резисторы*, изготавливаемые из сплавов с управляемой валентностью и разбавленных полупроводников, обладают лучшими шумовыми свойствами, чем угольные сопротивления. Предполагают, что это связано с однородностью материала и отсутствием зернистости в их структуре [16, 32]. Разновидностью полупроводниковых резисторов являются магнитосопротивления, величина которых изменяется пропорционально переменной составляющей постоянного магнитного поля, в которое помещается сопротивление. Шумы в последних зависят от интенсивности магнитных флуктуаций и мерцательного эффекта [44].

*Термисторы* (нелинейные полупроводниковые резисторы), изготавливаемые из материалов с высоким отрицательным температурным коэффициентом, обладают слабым мерцательным шумом, равномерным спектром ниже 100 Гц, а в области высоких частот — изменяющимся по закону  $f^{-3/2}$ .

*Варисторы* (переменные полупроводниковые резисторы), или титровые сопротивления, изготавливаемые спеканием под давлением смеси карбида кремния и связующего материала, содержат в объеме материала выпрямляющие контакты, и шумы в них подобны имеющим место в полупроводниковых диодах [16, 32].

*Тиратроны* относятся к числу элементов, принцип работы которых основан на ионизации газа при протека-

нии через него электрического тока. Плазменное состояние таких приборов характеризуется примерно равной концентрацией в ней электронов и ионов. Благодаря большей подвижности электронов ток через тиратрон обуславливается последними. Взаимодействуя между собой и соударяясь с ионами электроны в плазме находятся в беспорядочном движении. Это и является источником возникновения шумов в газоразрядных приборах, отличающихся высокой интенсивностью [98, 109].

Шумы в тиратронах зависят от анодного тока и падают с его уменьшением. Интенсивность флуктуаций после включения прибора не сразу устанавливается постоянной, в течение некоторого времени наблюдаются заметные колебания. Изменяется она в пределах 1,5—8,0 дБ в области частот от нескольких десятков герц и примерно до 5 МГц.

Высокой интенсивностью шумов отличаются индикаторные неоновые лампы. Напряжение шумов их может достигать нескольких десятков милливольт. Они имеют неравномерную спектральную плотность шумов, резко падающую с возрастанием частоты [98].

*Стабилитроны тлеющего разряда* имеют минимальные шумы при наименьшем токе, которые могут увеличиваться на 15—20 дБ в максимуме. Шумовое напряжение при полосе в несколько мегагерц может достигать милливольт и более. Верхняя граница шумов простирается до частот в несколько мегагерц [89, 98, 109].

*Фотоэлектронные умножители* отличаются отсутствием мерцательного эффекта и незначительной частотной зависимостью шума [57, 98]. Неравномерность его в полосе частот от нескольких герц до нескольких мегагерц составляет около 2 дБ. Шумы в фотоумножителях возникают вследствие дробового эффекта фототока.

Дробовой шум тока фотокатода

$$\overline{|i_{шд}|^2} = 2eI_0 \Delta f \quad (1.32)$$

усиливается в фотоумножителе последующими каскадами. К нему же добавляется шум вторичного тока эмиттеров, причем наибольшее влияние на величину шума оказывают первые каскады.

Полный шумовой ток фотоумножителя

$$\overline{|i_{шд}|^2} = 2eI_0 \Delta f K_I^2 (1 + F_{вт}), \quad (1.33)$$

где  $F_{вт}$  — коэффициент шума вторичной эмиссии.

*Трахотроны* — электровакуумные коммутационные приборы, имеют шумы, возникающие вследствие случайных колебаний плотности тока в электронном пучке. Интенсивность шумов трахотрона относительно постоянна в диапазоне от нескольких герц до тысяч мегагерц и по величине сравнима с флуктуациями тиратрона [98].

\* \*  
\*

Рассмотренные приборы в основном представляют традиционный состав элементов электрических цепей. Но с развитием микроэлектроники все большее применение начинают находить полупроводниковые аналоги пассивных элементов. При этом отдельные микроэлементы как конструктивные единицы утрачивают свое значение и выступают в виде совокупностей — интегральных функциональных узлов.

Новые возможности открывает применение оптоэлектроники, которая на базе полупроводниковых материалов позволяет создавать элементы, технологически совместимые с интегральными микросхемами. Однако технологическая интеграция микроэлементов не означает, что они могут не рассматриваться с точки зрения их индивидуальных шумовых свойств. Наоборот, все возрастающее количество полупроводниковых приборов, невозможность замены микроэлементов требуют самого тщательного анализа их свойств, и в этом отношении детальное изучение шумов отдельных микроэлементов, нормирование их шумовых параметров представляется совершенно необходимым.

## ОЦЕНКА ШУМОВ

### 2.1. СПОСОБЫ ОЦЕНКИ

**И**звестно несколько способов оценки шумов элементов электрических цепей и влияния их на сигнал. Одни из них давно уже прошли стадию формирования и общеприняты — эквивалентные источники шумового тока и напряжения, шумовые сопротивления и проводимости, температура шума; другие в окончательном виде не определились и по настоящее время служат предметом дискуссий — коэффициент шума и мера шума [4, 8, 24, 26, 30, 43, 84, 105].

По способу выражения шумовых свойств показатели шума можно разделить на абсолютные и относительные.

Первую группу составляют показатели, характеризующие интенсивность флуктуаций; они обладают размерностью и выражаются в эквивалентных единицах напряжения или тока, сопротивления или проводимости, температуры. Вторую группу составляют показатели, отображающие влияние флуктуаций на отношение сигнал/шум, они безразмерны и образуются путем сравнения однородных или безразмерных величин.

Абсолютные показатели шума более подходят для оценки и нормирования флуктуаций элементов электрических цепей, относительные — для выражения влияния шумов на величину сигнал/шум. В этом смысле показатели первой группы имеют вспомогательное значение.

### 2.2. ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ИСТОЧНИК

Метод эквивалентного источника шума состоит в том, что шумящий элемент (реже электрическая цепь) заменяется сохраняющим все его сигнальные свойства бесшумным элементом, а флуктуационные свойства приписываются некоторому эквивалентному источнику (одному или нескольким) шума. Источник шумового напряжения включается последовательно с сопротивлением и

параллельно проводимости включается источник шумового тока [17, 20, 26, 74]. Эквивалентные источники шума по всем признакам идентичны широко применяемым в теории электрических цепей задающим источникам сигнала.

В табл. 2.1 представлены эквивалентные (задающие) источники шума с краткой характеристикой их основных свойств. Общепринятые задающие источники шумового напряжения и тока дополнены идеальным и реальным источниками шумовой мощности, которые учитывают особенности согласованного включения электрических цепей [63].

Источники шумового напряжения, обладая близким к нулю внутренним сопротивлением, создают шумовое напряжение на нагрузке, практически не зависящее (или мало зависящее) от величины последней. Поэтому при смене нагрузок в электрической цепи изменяется лишь величина шумового тока.

Источники шумового тока, обладая близкой к нулю проводимостью, создают шумовой ток в нагрузке, не зависящий (или мало зависящий) от ее величины. Смена нагрузок поэтому приводит лишь к изменению на них шумового напряжения. Реальные источники шума подчиняются принципу замещения и могут заменяться один другим; исключение составляют невзаимозаменяемые идеальные источники напряжения и тока.

Введение эквивалентных источников шума не нарушает режимов работы или свойств цепи по отношению

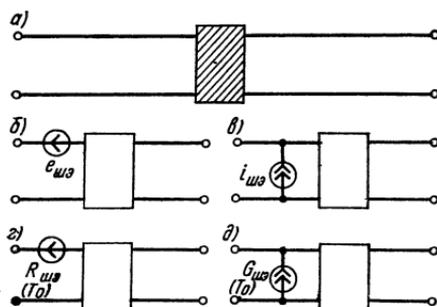
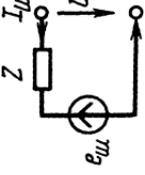
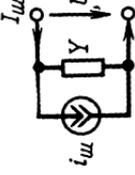
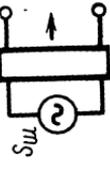


Рис. 2.1. Замещение шумов четырех- полюсника:

а) внутренних, б) эквивалентными шумовыми источниками напряжения, в) тока, г) эквивалентными шумовыми сопротивлениями, д) проводимостью

Таблица 2.1

Тип но- мера	Наименование величины	Идеальные источники		Реальные источники		Примечание
		обозначение	свойства	обозначение	свойства	
<i>E</i>	Источник шумового напряжения		Внутреннее сопротивление равно нулю		Внутреннее сопротивление не равно нулю	$e_{ш} = 2(kT \Delta f R_{ш})^{1/2}$ $R_{ш} \geq R$
<i>I</i>	Источник шумового тока		Внутренняя проводимость равна нулю		Внутренняя проводимость не равна нулю	$i_{ш} = 2(kT \Delta f G_{ш})^{1/2}$ $G_{ш} \geq G$
<i>S</i>	Источник шумовой мощности		Падающая волна не зависит от нагрузки		Падающая волна зависит от нагрузки	$s_{ш} = \frac{1}{2} e_{ш}$ или $s_{ш} = \frac{1}{2} i_{ш}$

к источнику сигнала и нагрузке или во взаимодействии всех ее звеньев. Идеальный источник шума  $e_{шз}$ , включенный последовательно, обладая нулевым сопротивлением, на передачу сигнала не влияет, точно так же как и шумовой источник  $i_{ш}$ , включенный параллельно и имеющий нулевую проводимость (рис. 2.1а, б, в).

В табл. 2.2 приведены основные шумящие пассивные элементы, для которых с помощью метода эквивалентного источника шума получены шумовые схемы замещения и путем перехода к эквивалентным шумовым сопротивлениям и проводимостям определены их шумовые параметры.

### 2.3. ЭКВИВАЛЕНТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Эквивалентное сопротивление шума (шумовое сопротивление) определяется из (1.1)

$$R_{ш} = \frac{\overline{|e_{ш}|^2}}{4 k T_0 \Delta f} \quad (2.1)$$

и эквивалентная проводимость шума (шумовая проводимость)

$$G_{ш} = \frac{\overline{|i_{ш}|^2}}{4 k T \Delta f} \quad (2.2)$$

путем приведения флуктуации в электрической цепи к тепловому шуму. Если в элементе содержится несколько источников флуктуаций и тепловой шум является лишь одной из составляющих, то  $R_{ш} > R_{шт}$  или  $G_{ш} > G_{шт}$  [10, 26, 71, 74, 83, 123].

При помощи эквивалентного шумового сопротивления в прошлом оценивались шумовые свойства электронных ламп. В настоящее время применяется оно и для построения шумовых схем замещения транзисторов и других элементов электрических цепей.

Сопротивление (проводимость) шума включается на входе лампы, транзистора или иного элемента. При этом сам элемент считается идеально бесшумным и обладает лишь сигнальными свойствами. Сопротивление шума учитывает только шумы, и при определении сигнальных величин в расчет не принимается. В этом смысле сопротивление шума является фиктивным и включается взамен вынесенного источника шумового напряжения (тока) (рис. 2.1г, д). В том и другом случаях на выходе элемента интенсивность шума должна сохра-

Таблица 2.2 Схемы замещения даны без учета паразитных емкости или индуктивности выводов)

Наименование элемента	Обозначение	Схемы замещения		Шумовые параметры	Примечание
		сигнальная	шумовая		
I Резистор				$R_{ш} = \frac{ e_{ш} ^2}{4kT\Delta f}$	При использовании аналогов пассивных элементов: $R_{ш} > R$ $G_{ш} > G$ $R_{шL} > R_L$ $G_{шL} > G_L$ $R_{шC} > R_C$ $G_{шC} > G_C$
				$G_{ш} = \frac{ i_{ш} ^2}{4kT\Delta f}$	
II Катушка				$R_{шL} = \frac{ e_{шL} ^2}{4kT\Delta f}$	
				$G_{шL} = \frac{ i_{шL} ^2}{4kT\Delta f}$	
III Конденсатор				$R_{шC} = \frac{ e_{шC} ^2}{4kT\Delta f}$	
				$G_{шC} = \frac{ i_{шC} ^2}{4kT\Delta f}$	

няться неизменной, равной имеющейся у реального элемента.

В настоящее время установлено, что посредством одного эквивалентного сопротивления шума не удастся достаточно полно охарактеризовать шумовые свойства элементов цепей с коррелированными источниками флуктуаций, а также определить режимы работы элементов в части характера и величины сопротивления источника сигнала, при которых достигается наименьшее ухудшение отношения сигнал/шум.

Вспомогательная роль сопротивления шума не снижает его значения в оценке шумов двухполюсников. Удобство его заключается в наглядности и в том, что при тепловых флуктуациях  $R_{ш} = R_{шт}$  и  $G_{ш} = G_{шт}$ , поэтому никаких дополнительных расчетов не требуется.

#### 2.4. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Одним из показателей, также применяемых для оценки флуктуационных свойств элементов и электрических цепей, является эквивалентная температура шума (шумовая температура). Преимущественно этот показатель используется для оценки устройства с низким уровнем собственных шумов [8, 17, 94, 98]. Введение эквивалентной температуры шума также основывается на ф-ле (1.1)

$$T_{ш} = \frac{|e_{ш}|^2}{4kR_0\Delta f} \quad \text{или} \quad T_{ш} = \frac{|i_{ш}|^2}{4kG_0\Delta f}. \quad (2.3)$$

Наряду с температурой шума, являющейся размерной величиной, используется безразмерный показатель — относительная температура шума, характеризующая спектральную плотность флуктуаций в сравнении с каким-либо источником шума, принимаемым за эталонный [8, 98].

В качестве такого источника удобно принять тепловой шум при нормальной температуре, тогда относительная температура шума

$$N = \frac{T_{ш}}{T_0}. \quad (2.4)$$

Это выражение используется не только для сравнения тепловых шумов, но и шумов иного происхождения.

На основании выражений (2.1), (2.2) и (2.3) установим

$$\frac{T_{ш}}{T_0} = \frac{R_{ш}}{R_0} = \frac{G_{ш}}{G_0}. \quad (2.5)$$

Соотношения между эквивалентными шумовыми сопротивлениями, проводимостями и температурой шума позволяют применительно к реальным условиям выбрать наиболее подходящий показатель и при необходимости переходить от одного к другому.

## 2.5. ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ/ШУМ

Отношение сигнал/шум характеризует превышение сигнала над шумом в заданной точке электрической цепи и широко используется в радиотехнике и электросвязи [23, 21, 33, 43, 74, 100, 109]. При определении отношения сигнал/шум ввиду отсутствия общепринятой методики оценки этого показателя указывают, какие величины сопоставляются. Иногда используются действующие напряжения сигнала и шума или пиковые значения тех же величин, сопоставляются также и мощности. В электросвязи преимущественно используется отношение мощностей сигнала и шума [9, 12, 29, 58]:

$$\xi = p_c - p_{ш} = 10 \lg \frac{P_c}{P_{ш}}, \quad (2.6)$$

где  $p_c$ ,  $p_{ш}$  и  $P_c$ ,  $P_{ш}$  — соответственно уровни (в децибелах) мощности сигнала и шума.

Отношение сигнал/шум, именуемое в электросвязи шумозащищенностью, лежит в основе определения коэффициента шума.

## 2.6. КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА

Коэффициент шума является показателем, характеризующим ухудшение отношения сигнал/шум при прохождении сигнала через электрическую цепь с внутренними источниками флуктуаций. В настоящее время не представляется возможным сослаться на единственное общепринятое определение этого показателя. Многообразие предложенных понятий, накладываемых ограничений и частных условий затрудняет использование коэффициента шума и приводит к неясностям при определении и расчете его.

Изначальное определение коэффициента шума [120, 121], предложенное для оценки шумовых свойств элект-

трических цепей, по изменению отношения сигнал/шум на выходе шумящего четырехполюсника в сравнении с отношением сигнал/шум на входе идеально бесшумного, имеет существенные ограничения. Определялся он для активных элементов (электронных ламп) при номинальном усилении (достаточно большом и без учета шумов нагрузки).

В реальных условиях электрические цепи, как правило, находятся не в режимах двустороннего сопряжения и, более того, почти всегда (учитывая же производственный разброс параметров элементов — практически всегда) они несогласованны с источником сигнала и нагрузкой. Поэтому в последующих определениях на коэффициент шума не накладывалось ограничений по сопротивлению, что способствовало выявлению условий минимизации влияния внутренних флуктуаций на сигнал путем рационального выбора сопротивления источника сигнала [26, 74, 123]. В дальнейшем (с учетом флуктуаций нагрузки) понятие коэффициента шума распространяется на пассивные цепи [26, 74].

После снятия начальных ограничений положение, однако, не стабилизировалось, появляется множество предложений, уточняющих и дополняющих понятие коэффициента шума. Суть большинства из них сводится к наложению новых ограничений, подчинению коэффициента шума частным условиям, продиктованным локальными техническими задачами [8, 24, 30].

В настоящее время насчитывается несколько десятков определений и названий коэффициентов шума, различающихся в основном следующим: во внимание принимаются тепловые шумы внутреннего сопротивления источника сигнала или же вместе с ними учитываются помехи внешнего происхождения; учитываются флуктуации нагрузки или они во внимание не принимаются; фиксируются температурные режимы, полоса частот и т. д. Усугубляет положение и то обстоятельство, что зачастую не оговаривается, каким образом оцениваются передающие свойства цепи, характер сопротивлений источника сигнала и нагрузки, а также использование множества синонимов, например усиление при сопряженных с четырехполюсником источнике сигнала и нагрузке именуется располагаемым, доступным, номинальным и т. д.

Для выяснения принципиальной возможности упорядочения существующего положения на основе обобщаю-

щих определений, прежде всего, попытаемся из всего многообразия предложений отделить общее от частного, имея при этом в виду — общности показателей шума можно достичь только в том случае, если они будут едиными для активных и пассивных четырехполосников, цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами. Для большей ясности, по-видимому, целесообразно разграничить коэффициенты шума системы передачи и собственно четырехполосника.

Сам по себе принцип оценки шумовых свойств четырехполосника по изменению отношения сигнал/шум, в пределах его разрешающих возможностей, не вызывает возражений. Поэтому полученные на его основе в самом общем виде показатели шума всегда могут быть применены для решения множества частных задач с учетом их особенностей, например состава источников флуктуаций на входе, ширины полосы частот, характера сопротивлений источника сигнала и нагрузки, температурных режимов, эквивалентных выражений интенсивности флуктуаций (шумовой температуры, сопротивлений и проводимостей шума) и т. д. Принципиально важным для обобщений является и то обстоятельство, что коэффициент шума всегда в себе содержит в явной или скрытой форме показатель передачи, влияющий на его величину.

В теории электрических цепей и электросвязи используется несколько видов показателей передачи, рекомендованных МККТТ (МККФ) [6, 18, 62, 79]. Входящие в число их номинальное, характеристическое и вносимое усиления (затухания) используются также в радиотехнике и электронике [24, 37, 95, 102]. Эти показатели наиболее полно отображают передающие свойства электрических цепей, что дает достаточно оснований для определения по аналогии с ними показателей шума. Только при таком подходе возможно достижение общности в определении сигнальных и шумовых величин. Отсюда очевидно, что ограничиться одним коэффициентом шума не представляется возможным, точно так же как не удастся обойтись единственным показателем передачи. Каждому показателю передачи должен соответствовать определенный коэффициент шума, совместимый с ним и определяемый в аналогичных условиях.

В табл. 2.3 приведены обобщенные выражения коэффициентов шума, полученные за исключением первого, на основе рекомендованных МККТТ показателей пере-

Таблица 2.3

Обозначение	Наименование показателя	Принцип определения		Примечание
		схема соединений	формула	
$F_1$	Коэффициент шума		$F_1 = 10 \lg \times \frac{P_{сs1}/P_{шс1}}{P_{сs2}/P_{шс2}} = 10 \lg \times \frac{F_{шс2}}{P_{шс1}} + a_1$	$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + iX_1 \\ Z_2 &= R_2 + iX_2 \\ z_{вх} &\neq Z_1 \\ z_{вых} &\neq Z_2 \\ R_{ш1} &\geq R_1 \\ R_{ш2} &\geq R_2 \\  e_{ш1} ^2 &= 4kTR_{ш1}\Delta f \\  e_{ш2} ^2 &= 4kTR_{ш2}\Delta f \end{aligned}$
$F_{с1}$	Характеристический*) коэффициент шума		$F_{с1} = 10 \lg \times \frac{P_{сs1}/P_{шс1}}{P_{сs2}/P_{шс2}} = 10 \lg \times \frac{P_{шс2}}{P_{шс1}} + a_{с1}$	$\begin{aligned} Z_{с1} &= R_{с1} + iX_{с1} \\ Z_{с2} &= R_{с2} + iX_{с2} \\ R_{ш1} &\geq R_{с1} \\ R_{ш2} &\geq R_{с2} \\  e_{шс1} ^2 &= 4kTR_{шс1}\Delta f \\  e_{шс2} ^2 &= 4kTR_{шс2}\Delta f \end{aligned}$
$F_{н1}$	Номинальный**) коэффициент шума		$F_{н1} = 10 \lg \times \frac{P_{сa1}/P_{шa1}}{P_{сa2}/P_{шa2}} = 10 \lg \times \frac{P_{шa2}}{P_{шa1}} + a_{н1}$	$\begin{aligned} Z_{н1} &= R_{н1} + iX_{н1} \\ Z_{н2} &= R_{н2} + iX_{н2} \\ R_{ш1} &\geq R_{н1} \\ R_{ш2} &\geq R_{н2} \\  e_{ш1} ^2 &= 4kTR_{ш1}\Delta f \\  e_{ш2} ^2 &= 4kTR_{ш2}\Delta f \end{aligned}$

Продолжение табл. 2.3

Обозначение	Наименование показателя	Принцип определения		Примечание
		Схема соединений	формула	
$F_{в1}$	Вносимый коэффициент шума		$F_{в1} = 10 \lg \times \frac{P'_{cs2}/P'_{шс2}}{P_{cs2}/P_{шс2}} = 10 \lg \times \frac{P_{шс2}}{P'_{шс2}} + a_{b1}$	$Z_1 = R_1 + iX_2$ $Z_2 = R_2 + iX_2$ $R_{ш1} \geq R_1$ $R_{ш2} \geq R_2$ $ e_{ш1} ^2 = 4kTR_{ш1}\Delta F$ $ e_{ш2} ^2 = 4kTR_{ш2}\Delta F$
$F_{p1}$	Рабочий коэффициент шума		$F_{p1} = 10 \lg \times \frac{P'_{cs2}/P'_{шс2}}{P_{cs2}/P_{шс2}} = 10 \lg \times \frac{P_{шс2}}{P'_{шс2}} + a_{p1}$	$P_{cs2}, P'_{cs2}$ и $P_{шс2}, P'_{шс2}$ — кажущиеся мощности сигнала и шума
$F_{д1}$	Действующий коэффициент шума		$F_{д1} = 10 \lg \times \frac{P'_{ca2}/P'_{ша2}}{P_{ca2}/P_{ша2}} = 10 \lg \times \frac{P_{ша2}}{P'_{ша2}} + a_{д2}$	$P_{ca2}, P'_{ca2}$ и $P_{ша2}, P'_{ша2}$ — активные мощности сигнала и шума

Примечание: Шумы порождаются флуктуациями источника сигнала, четырехполюсника и нагрузки (а), только источником сигнала (б). Возможные синонимы: \*) согласованный, \*\*) сопряженный.

дачи. Из соображений смысловой и терминологической общности эти коэффициенты шума поименованы подобно показателям передачи, которым они соответствуют по принципу определения. При необходимости показатели шума можно также выразить через шумовые и сигнальные напряжения или токи.

Представленные выражения, полученные для системы передачи, учитывают флуктуации источника сигнала, четырехполюсника и нагрузки. Коэффициент шума четырехполюсника находится из этих выражений исключением флуктуаций нагрузки. Избыточный коэффициент шума определяется исключением флуктуаций источника сигнала и нагрузки (он на единицу меньше коэффициента шума четырехполюсника).

Приведенные в таблицах показатели шума наряду с основными свойствами, вытекающими из принципа их определения, обладают некоторыми дополнительными качествами:

— коэффициент шума позволяет выяснить влияние сопротивлений источника сигнала и нагрузки, минимальная величина его достигается при шумовом сопряжении цепи и содержит в себе сведения о предельных возможностях шумящей системы передачи, четырехполюсника (транзистора, усилителя и т. д.) в сравнении с идеально бесшумной;

— номинальный коэффициент шума учитывает влияние флуктуаций на отношение сигнал/шум в условиях максимальной передачи активной мощности сигнала; при нормальной температуре  $T_0$  шума источника сигнала он представляет, своего рода, сопряженную шумовую постоянную (для четырехполюсника совпадает с изначальным определением [20, 121]);

— характеристический коэффициент шума учитывает влияние флуктуаций на отношение сигнал/шум в условиях максимальной передачи кажущейся мощности сигнала, при нормальной температуре шума источника сигнала представляет, своего рода, согласованную постоянную шума; он позволяет установить влияние несогласованности на шумовые свойства цепи;

— вносимый коэффициент шума отображает физическую картину ухудшения отношения сигнал/шум при включении между источником сигнала и нагрузкой четырехполюсника (например, фильтра, корректора, усилителя и т. д.).

В отличие от коэффициента шума, получаемого в результате сравнения шумящей цепи с идеально бесшумной, вносимый коэффициент шума показывает изменение отношения сигнал/шум в рабочих условиях цепи. Это обстоятельство наглядно проявляется при источнике сигнала с реактивным бесшумным сопротивлением (конденсаторный микрофон), когда коэффициент шума оказывается неприемлемым. На вносимый коэффициент шума реактивное сопротивление источника сигнала никаких ограничений не накладывает.

Таким образом, тот или иной коэффициент шума выбирается сообразно с условиями решаемой задачи и с учетом используемого показателя передачи. При необходимости расчетным путем можно перейти от одних показателей передачи и шума к другим. Попытки ограничиться в оценке шумовых свойств электрических цепей каким-либо одним коэффициентом шума равноценны отказу от выработанных уже МККТТ показателей передачи и не могут способствовать решению весьма разнообразных по постановке шумовых задач. И наоборот, совокупность обобщенных показателей шума, приведенных в таблице, позволяет оценивать флуктуационные свойства электрических цепей при сопряженных, согласованных, произвольных нагрузках как в сравнении с идеально бесшумной системой передачи (четырёхполосником), так и в рабочих условиях.

Коэффициент шума не является показателем; отвечающим на все вопросы, возникающие при оценке и выражении шумовых свойств электрических цепей. Поэтому целесообразность использования коэффициента шума (как показателя вообще) зависит от существа решаемых задач, последние же различны в условиях разработки элементов цепей, функциональных узлов и аппаратуры, ее промышленного изготовления и эксплуатации. Отдавая должное коэффициенту шума как количественному показателю, не следует переоценивать его возможностей. Так, например, если к оценке шумов подойти с позиций специалистов, разрабатывающих аппаратуру, то на элементы схем (транзисторы, лампы, операционные усилители в интегральном исполнении и т. д.) следует задавать, как будет показано далее, первичные шумовые параметры  $R_{шн}$ ,  $G_{шн}$ ,  $Z_{кор}$  или  $G_{шн}$ ,  $R_{шн}$ ,  $Y_{кор}$  и нормировать их зависимости от частоты, температуры, радиации, питающих токов, напряжений и т. д. Одного коэффициента шума в этом случае совершенно недос-

точно, к тому же он может быть рассчитан по первичным параметрам, точно так же как минимальное значение коэффициента шума и условия его получения.

Функционально законченные узлы и устройства в целом, в условиях производства, наоборот, целесообразно оценивать по коэффициенту шума, желательно характеристическому, как несущему наибольшую информацию и позволяющему рассчитывать зависимость шумовых величин при несогласованном включении.

Наконец, общность в определении сигнальных и шумовых показателей раскрывает широкие возможности для математического моделирования и программного расчета шумящих цепей, включая оптимизацию их по критерию шумозащищенности, а также позволяет рассчитывать в дальнейшем на создание единых приборных комплексов для измерения шумовых и сигнальных показателей.

## 2.7. МЕРА ШУМА

Мера шума — показатель, используемый иногда для сопоставления усилительных каскадов с неодинаковыми коэффициентами шума и усиления. С ее помощью в отдельных случаях возможно определение их места в цепи, исходя из соображений получения более выгодного отношения сигнал/шум [105]:

$$M = \frac{F - 1}{1 - 1/K_n}, \quad (2.7)$$

где  $K_n$  — номинальное усиление каскада по мощности.

При большом усилении мера шума и коэффициент шума практически не отличаются по величине, поэтому применительно к многокаскадным усилителям она не несет какой-либо новой информации. Целесообразность использования меры шума при оценке свойств цепей, не обладающих усилением, и многополюсников неочевидна.

Для сравнения двух усилительных каскадов, определения места и при ступенчатом соединении, предложен еще один показатель — шумовая добротность

$$Q_{ш} = K_p/F, \quad (2.8)$$

представляющий отношение коэффициента усиления по мощности к коэффициенту шума [2.7].

Критерием для выбора лучшего в шумовом отношении каскада служит отношение  $Q_{ш12} > Q_{ш21}$ .

## ШУМЯЩИЙ ДВУХПОЛЮСНИК

## 3.1. СИСТЕМЫ ПАРАМЕТРОВ

**Ш**умящий двухполюсник обобщенного вида может быть задан шумящим сопротивлением  $Z$  (рис. 3.1а) или шумящей проводимостью  $Y$  (рис. 3.2в). Воспользовавшись методом эквивалентного источника шума, найдем шумовые схемы замещения двухполюсника (рис. 3.1б и г). Источник шума  $e_{ш}$  определяется при разомкнутых выводах,  $i_{ш}$  — при замыкании их. Если к двухполюснику

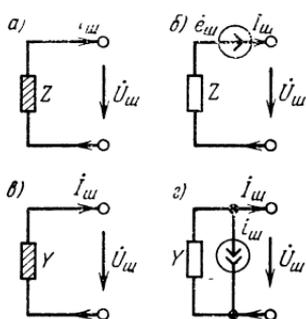


Рис. 3.1. Шумовые схемы замещения двухполюсников (а) и (в), сопротивления (б), проводимости (г)

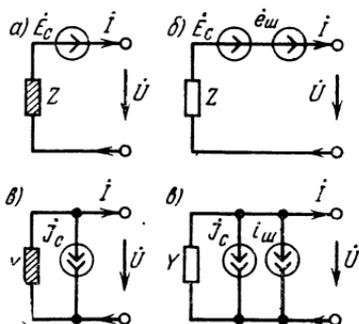


Рис. 3.2. Шумовые схемы замещения источников сигнала (а), (в), с внутренним сопротивлением (б) и проводимостью (г)

подключить источники сигнала  $\dot{E}_c$  или  $\dot{I}_c$  (рис. 3.2а и в), шумовые схемы замещения которых представлены на рис. 3.2б и г [35], то на основании теории автономного двухполюсника

$$\dot{U} = Z \dot{I} + \dot{e}_{ш} \quad \text{или} \quad \dot{I} = Y \dot{U} + \dot{i}_{ш}, \quad (3.1)$$

где  $Y = \frac{1}{Z}$  и  $\dot{I}_c = -\dot{E}_c \frac{1}{Z}$ .

При  $\dot{e}_{ш}=0$  или  $\dot{i}_{ш}=0$  двухполюсник обращается в неавтономный и его сигнальные свойства выражаются уравнениями:

$$\dot{U} = Z \dot{I} \quad \text{или} \quad \dot{I} = Y \dot{U}. \quad (3.2)$$

В принципе, при наличии внутренних источников шума величины  $Z$  и  $Y$  могут быть определены по методу холостого хода и короткого замыкания без подведения к двухполюснику внешнего сигнала  $Z = -e_{ш}/i_{ш}$  или  $Y = -i_{ш}/e_{ш}$ . Но на практике из-за незначительности величин и неопределенности фаз  $\dot{e}_{ш}$  и  $\dot{i}_{ш}$  эти параметры определяются по формулам

$$Z = \dot{U}_c / \dot{I}_c \quad \text{или} \quad Y = \dot{I}_c / \dot{U}_c \quad (3.3)$$

с использованием внешнего источника сигнала.

Переходя от шумовых источников к эквивалентным шумовым сопротивлениям или проводимостям, на основании (2.1) и (2.2) определим:

— эквивалентное шумовое сопротивление

$$R_{ш} = \frac{\overline{|e_{ш}|^2}}{4 k T \Delta f}, \quad (3.4)$$

— эквивалентную шумовую проводимость

$$G_{ш} = \frac{\overline{|i_{ш}|^2}}{4 k T \Delta f}, \quad (3.5)$$

которые примем в качестве шумовых параметров двухполюсника, используя величину  $R_{ш}$  при последовательном соединении элементов и  $G_{ш}$  — при параллельном.

Для решения практических задач часто используют составные полиэлементные двухполюсники, которые в совокупности образуют результирующий шумящий двухполюсник. Последний в общем случае может содержать любое  $\mu$  число составляющих, соединенных тем или иным способом. Основные виды соединений шумящих двухполюсников представлены на рис. 3.3.

### 3.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

При последовательном соединении, как известно, результирующая величина сопротивления находится сложением сопротивлений всех составляющих

$$Z^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} Z^{(s)} \quad (3.6)$$

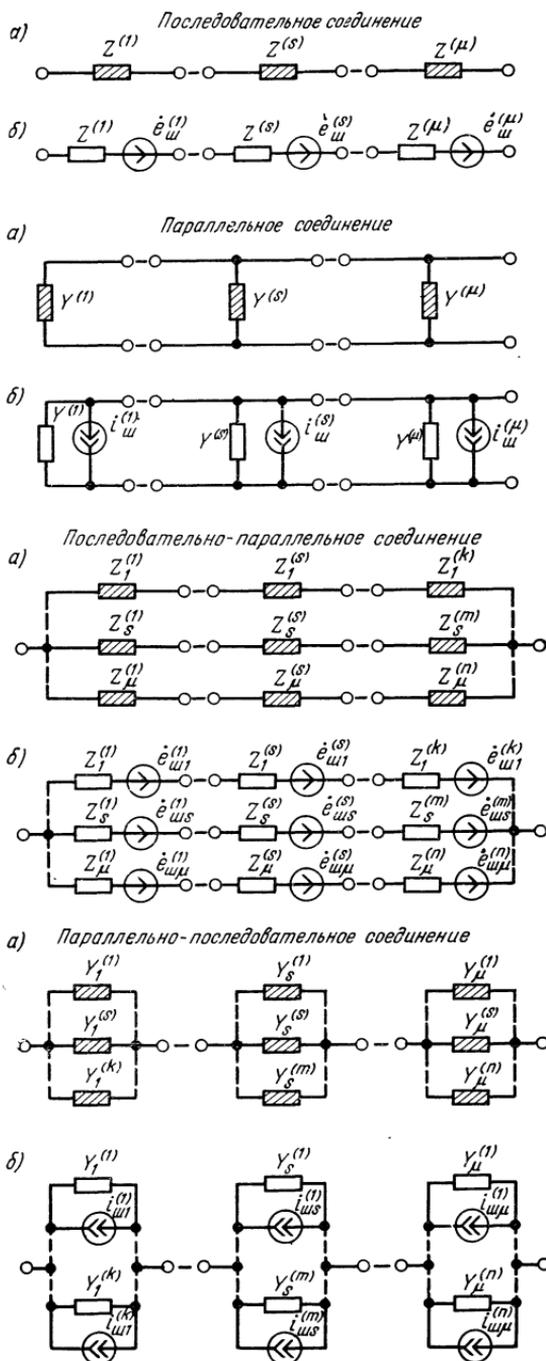


Рис. 3.3. Соединения шумящих двухполюсников (а) с вынесенными источниками шума (б)

и результирующая величина шумового напряжения записывается в виде

$$\dot{e}_{\text{ш}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} \dot{e}_{\text{ш}}^{(s)}. \quad (3.7)$$

При некоррелированных источниках флуктуаций составляющих соединения определим эквивалентное шумовое сопротивление результирующего двухполюсника, используя для этого (3.4) и (3.7):

$$R_{\text{ш}}^{(p)} = \frac{\sum_{s=1}^{\mu} |\dot{e}_{\text{ш}}^{(s)}|^2}{4 k T \Delta f} = \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ш}}^{(s)}. \quad (3.8)$$

В случае только тепловых флуктуаций —  $R_{\text{ш}}^{(p)} = R^{(p)}$ , где  $R^{(p)} = \text{Re}(Z^{(p)})$  при комплексном характере сопротивления.

### 3.3. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

При параллельном соединении результирующая проводимость находится сложением проводимостей всех двухполюсников

$$Y^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} Y^{(s)} \quad (3.9)$$

и результирующий шумовой ток

$$i_{\text{ш}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} i_{\text{ш}}^{(s)}, \quad (3.10)$$

отсюда на основании (3.10) и (3.5) определяется результирующая шумовая проводимость

$$G_{\text{ш}}^{(p)} = \frac{\sum_{s=1}^{\mu} |i_{\text{ш}}^{(s)}|^2}{4 k T \Delta f} = \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш}}^{(s)}. \quad (3.11)$$

При наличии только тепловых флуктуаций  $G_{\text{ш}}^{(p)} = G^{(p)}$ , где  $G^{(p)} = \text{Re}(Y^{(p)})$  в случае комплексного характера проводимости.

### 3.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Смешанное соединение последовательно-параллельного вида в общем случае, предположим, содержит  $\mu$  параллельно включенных последовательных звеньев, 1-е из которых образовано  $k$  сопротивлениями, промежуточное  $s$ -е, —  $m$  и последнее,  $\mu$ -е, —  $n$ . Первоначально, используя (3.6) — (3.8), найдем результирующие величины для каждого из звеньев  $k$ .

*Звено 1-е.* В соответствии с (3.6) определим  $Z_1^{(p)} = \sum_{s_1=1}^k Z_1^{(s_1)}$ ,

откуда  $Y_1^{(p)} = \frac{1}{Z^{(p)}} = \left( \sum_{s_1=1}^k Z_1^{(s_1)} \right)^{-1}$ , и согласно

(3.7) найдем  $\dot{e}_{\text{ш1}}^{(p)} = \sum_{s_1=1}^k \dot{e}_{\text{ш1}}^{(s_1)}$ . Используя (3.4), полу-

чим  $R_{\text{ш1}}^{(p)} = \frac{\sum_{s_1=1}^k |e_{\text{ш1}}^{(s_1)}|^2}{4kT\Delta f} = \sum_{s_1=1}^k R_{\text{ш1}}^{(s_1)}$ , и, следовательно, ре-

зультирующая шумовая проводимость 1-го звена

$$G_{\text{ш1}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш1}}^{(p)}}{|Z_1^{(p)}|^2} = \sum_{s_1=1}^k R_{\text{ш1}}^{(s_1)} \left| \sum_{s_1=1}^k Z_1^{(s_1)} \right|^{-2}. \quad (3.12)$$

*Звено  $s$ -е.* В той же последовательности найдем результирующие величины  $Z_s^{(p)} = \sum_{s_s=1}^m Z_s^{s_s}$ , отсюда  $Y_s^{(p)} =$

$$= \frac{1}{Z_s^{(p)}} = \left( \sum_{s_s=1}^m Z_s^{s_s} \right)^{-1} \text{ и соответственно } \dot{e}_{\text{шs}}^{(p)} = \sum_{s_s=1}^m \dot{e}_{\text{шs}}^{(s_s)};$$

определив результирующее шумовое сопротивление

$$R_{\text{шs}}^{(p)} = \frac{\sum_{s_s=1}^m |e_{\text{шs}}^{(s_s)}|^2}{4kT\Delta f} = \sum_{s_s=1}^m R_{\text{шs}}^{(s_s)}, \text{ далее найдем}$$

$$G_{\text{шs}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шs}}^{(p)}}{|Z_s^{(p)}|^2} = \sum_{s_s=1}^m R_{\text{шs}}^{(s_s)} \left| \sum_{s_s=1}^m Z_s^{(s_s)} \right|^{-2}. \quad (3.13)$$

Звено  $\mu$ -е. Прделав аналогичные с предыдущим операции, найдем  $Z_{\mu}^{(p)} = \sum_{s_{\mu}=1}^n Z_{\mu}^{(s_{\mu})}$  и соответственно  $Y_{\mu}^{(p)} =$   
 $= \frac{1}{Z_{\mu}^{(p)}} = \left( \sum_{s_{\mu}=1}^n Z_{\mu}^{(s_{\mu})} \right)^{-2}$ ; после чего, определив  $\dot{e}_{\text{ш}\mu}^{(p)} =$

$$= \sum_{s_{\mu}=1}^n \dot{e}_{\text{ш}\mu}^{(s_{\mu})}, \text{ найдем } R_{\text{ш}\mu}^{(p)} = \frac{\sum_{s_{\mu}=1}^n |\dot{e}_{\text{ш}\mu}^{(s_{\mu})}|^2}{4kT\Delta f} = \sum_{s_{\mu}=1}^n R_{\text{ш}\mu}^{(s_{\mu})},$$

отсюда

$$G_{\text{ш}\mu}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш}\mu}^{(p)}}{|Z_{\mu}^{(p)}|^2} = \sum_{s_{\mu}=1}^n R_{\text{ш}\mu}^{(s_{\mu})} \left| \sum_{s_{\mu}=1}^n Z_{\mu}^{(s_{\mu})} \right|^{-2}. \quad (3.14)$$

Для всего соединения, используя (3.9), найдем

$$Y^{(p)} = Y_1^{(p)} + \dots + Y_s^{(p)} + \dots + Y_{\mu}^{(p)} =$$

$$= \left( \sum_{s_1=1}^k Z_1^{(s_1)} \right)^{-1} + \dots + \left( \sum_{s_s=1}^m Z_s^{(s_s)} \right)^{-1} + \dots + \left( \sum_{s_{\mu}=1}^n Z_{\mu}^{(s_{\mu})} \right)^{-1} \quad (3.15)$$

и в соответствии с (3.11)

$$G_{\text{ш}1}^{(p)} = G_{\text{ш}1}^{(p)} + \dots + G_{\text{ш}s}^{(p)} + \dots + G_{\text{ш}\mu}^{(p)} = \sum_{s_1=1}^k R_{\text{ш}1}^{(s_1)} \left| \sum_{s_1=1}^k Z_1^{(s_1)} \right|^{-2} + \dots +$$

$$+ \sum_{s_s=1}^m R_{\text{ш}s}^{(s_s)} \left| \sum_{s_s=1}^m Z_s^{(s_s)} \right|^{-2} + \dots + \sum_{s_{\mu}=1}^n R_{\text{ш}\mu}^{(s_{\mu})} \left| \sum_{s_{\mu}=1}^n Z_{\mu}^{(s_{\mu})} \right|^{-2}. \quad (3.16)$$

### 3.5. ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Соединение параллельно-последовательного вида также относится к числу смешанных и в общем случае, предположим, содержит  $\mu$  последовательно включенных групп параллельных шумящих двухполосников. Первое звено содержит  $k$  параллельно включенных шумящих двухполосников, промежуточное  $s$ -е —  $m$  и последнее  $\mu$ -е —  $n$ .

Определим, используя (3.9) — (3.11), результирующие величины для каждого из звеньев.

Звено 1-е. По (3.9) найдем  $Y_1^{(p)} = \sum_{s_1=1}^k Y_1^{(s_1)}$ , откуда

$$Z_1^{(p)} = \frac{1}{Y_1^{(p)}} = \left( \sum_{s_1=1}^k Y_1^{(s_1)} \right)^{-1};$$

согласно (3.10) определим результирующий шумовой ток  $i_{\text{ш1}}^{(p)} = \sum_{s_1=1}^k i_{\text{ш1}}^{(s_1)}$ . Воспользо-

вавшись (3.5), найдем  $G_{\text{ш1}}^{(p)} = \frac{\sum_{s_1=1}^k |i_{\text{ш1}}^{(s_1)}|^2}{4 k T \Delta f} = \sum_{s_1=1}^k G_{\text{ш1}}^{(s_1)}$

и далее определим

$$R_{\text{ш1}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш1}}^{(p)}}{|Y_1^{(p)}|^2} = \sum_{s_1=1}^k G_{\text{ш1}}^{(s_1)} \left| \sum_{s_1=1}^k Y_1^{(s_1)} \right|^{-2}. \quad (3.17)$$

Звено s-е. В аналогичной последовательности найдем результирующие величины  $Y_s^{(p)} = \sum_{s_s=1}^m Y_s^{(s_s)}$ , откуда

$$Z_s^{(p)} = \frac{1}{Y_s^{(p)}} = \left( \sum_{s_s=1}^m Y_s^{(s_s)} \right)^{-1},$$

результирующие значение

$$i_{\text{шs}}^{(p)} = \sum_{s_s=1}^m i_{\text{шs}}^{(s_s)} \quad \text{и} \quad G_{\text{шs}}^{(p)} = \frac{\sum_{s_s=1}^m |i_{\text{шs}}^{(s_s)}|^2}{4 k T \Delta f} = \sum_{s_s=1}^m G_{\text{шs}}^{(s_s)}.$$

Наконец, определим

$$R_{\text{шs}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шs}}^{(p)}}{|Y_s^{(p)}|^2} = \sum_{s_s=1}^m G_{\text{шs}}^{(s_s)} \left| \sum_{s_s=1}^m Y_s^{(s_s)} \right|^{-2}. \quad (3.18)$$

Звено  $\mu$ -е. Подобно предыдущему найдем

$$Y_\mu^{(p)} = \sum_{s_\mu=1}^n Y_\mu^{(s_\mu)}, \quad \text{отсюда} \quad Z_\mu^{(p)} = \frac{1}{Y_\mu^{(p)}} = \left( \sum_{s_\mu=1}^n Y_\mu^{(s_\mu)} \right)^{-1};$$

результатирующий шумовой ток  $i_{\text{ш}\mu}^{(p)} = \sum_{s_\mu=1}^n i_{\text{ш}\mu}^{(s_\mu)}$  и соответ-

ственно  $G_{\text{ш}\mu}^{(p)} = \frac{\sum_{s_\mu=1}^n \overline{|i_{\text{ш}\mu}^{(s_\mu)}|^2}}{4kT\Delta f} = \sum_{s_\mu=1}^n G_{\text{ш}\mu}^{(s_\mu)}$ , откуда

$$R_{\text{ш}\mu}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш}\mu}^{(p)}}{|Y_{\mu}^{(p)}|^2} = \sum_{s_\mu=1}^n G_{\text{ш}\mu}^{(s_\mu)} \left| \sum_{s_\mu=1}^n Y_{\mu}^{(s_\mu)} \right|^{-2}. \quad (3.19)$$

Для всего соединения, используя (3.6), определим результирующее сопротивление

$$\begin{aligned} Z^{(p)} &= Z_1^{(p)} + \dots + Z_s^{(p)} + \dots + Z_\mu^{(p)} = \\ &= \left( \sum_{s_1=1}^k Y_1^{(s_1)} \right)^{-1} + \dots + \left( \sum_{s_s=1}^m Y_s^{(s_s)} \right)^{-1} + \dots + \left( \sum_{s_\mu=1}^n Y_\mu^{(s_\mu)} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (3.20)$$

и согласно (3.4) найдем результирующее шумовое сопротивление

$$\begin{aligned} R_{\text{ш}}^{(p)} &= R_{\text{ш}1}^{(p)} + \dots + R_{\text{ш}s}^{(p)} + \dots + R_{\text{ш}\mu}^{(p)} = \\ &= \sum_{s_1=1}^k G_{\text{ш}1}^{(s_1)} \left| \sum_{s_1=1}^k Y_1^{(s_1)} \right|^{-2} + \dots + \sum_{s_s=1}^m G_{\text{ш}s}^{(s_s)} \left| \sum_{s_s=1}^m Y_s^{(s_s)} \right|^{-2} + \dots + \\ &+ \sum_{s_\mu=1}^n G_{\text{ш}\mu}^{(s_\mu)} \left| \sum_{s_\mu=1}^n Y_\mu^{(s_\mu)} \right|^{-2}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Рассмотренные основные виды соединений шумящих двухполюсников охватывают значительное число используемых на практике схем. Полученные соотношения путем сочетания их позволяют определить расчетные соотношения и для более сложных структур двухполюсников.

Применяя полученные формулы, найдем сигнальные и шумовые величины для некоторых наиболее часто встречающихся полиэлементных структур шумящих двухполюсных цепей. При этом ограничимся соединениями, содержащими не свыше четырех двухполюсников, каждый из которых характеризуется комплексным

сопротивлением  $Z_i = R_i + iX_i$  или проводимостью  $Y_i = G_i - iB_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ).

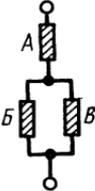
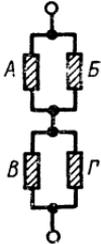
В табл. 3.1—3.4 приведены найденные первоначально результирующие шумовые токи и напряжения, на основе которых затем получены результирующие шумовые параметры, сведенные в табл. 3.5—3.8.

Отдельно взятые шумящие двухполюсники обобщенного вида, входящие в рассмотренные соединения, в свою очередь, могут состоять из соединений резисторов, конденсаторов, катушек. Сигнальные схемы замещения этих элементов учитывают потери в катушках последовательно включенными сопротивлениями и в конденсаторах — параллельными проводимостями.

Шумовые схемы замещения, кроме нешумящих сопротивлений и проводимостей потерь, содержат источники шумового напряжения или тока. Шумовые источники используются для определения шумовых параметров: шумового сопротивления для двухполюсников при последовательном соединении и шумовой проводимости — при параллельном. Обычные резисторы, конденсаторы и катушки, если они не имеют других источников флуктуаций, кроме тепловых, относятся к тем элементам, в которых активные составляющие сопротивлений и проводимостей соответствуют по величине их шумовым параметрам.

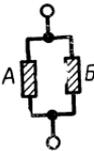
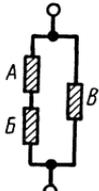
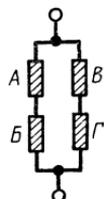
Аналоги пассивных элементов, реализуемые на полупроводниковых материалах, имеют шумовые параметры, по величине превосходящие сопротивления и проводимости потерь. При интегральной технологии возможна корреляционная связь между шумовыми источниками.

Таблица 3.1

№ шл.	Схема соединения	Тип элемента				Результирующая величина $\dot{e}_{ш}^{(p)}$
		А	Б	В	Г	
1		$Z_1$	$Z_2$	—	—	$\dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2}$
		$Z_1$	$Y_2$	—	—	$\dot{e}_{ш1} + \frac{i_{ш2}}{Y_2}$
		$Y_1$	$Y_2$	—	—	$\frac{i_{ш1}Y_2 + i_{ш2}Y_1}{Y_1Y_2}$
2		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	—	$\dot{e}_{ш1} + \frac{\dot{e}_{ш2}Z_3 + \dot{e}_{ш3}Z_2}{Z_2 + Z_3}$
		$Z_1$	$Z_2$	$Y_3$	—	$\dot{e}_{ш1} + \frac{\dot{e}_{ш2} + i_{ш3}Z_2}{Z_2Y_3 + 1}$
		$Z_1$	$Y_2$	$Y_3$	—	$\dot{e}_{ш1} + \frac{i_{ш2} + i_{ш3}}{Y_2 + Y_3}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	—	$\frac{i_{ш1}(Y_2 + Y_3) + (i_{ш2} + i_{ш3})Y_1}{(Y_2 + Y_3)Y_1}$
		$Y_1$	$Z_2$	$Z_3$	—	$\frac{i_{ш1}(Z_2 + Z_3) + (\dot{e}_{ш2}Z_3 + \dot{e}_{ш3}Z_2)Y_1}{(Z_2 + Z_3)Y_1}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Z_3$	—	$\frac{i_{ш1}(Y_2Z_3 + 1) + (i_{ш2}Z_3 + \dot{e}_{ш3})Y_1}{Y_1(Y_2Z_3 + 1)}$
3		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{\dot{e}_{ш1}Z_2 + \dot{e}_{ш2}Z_1}{Z_1 + Z_2} + \frac{\dot{e}_{ш3}Z_4 + \dot{e}_{ш4}Z_3}{Z_3 + Z_4}$
		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Y_4$	$\frac{\dot{e}_{ш1}Z_2 + \dot{e}_{ш2}Z_1}{Z_1 + Z_2} + \frac{\dot{e}_{ш3} + i_{ш4}Z_3}{Z_3Y_4 + 1}$
		$Z_1$	$Y_2$	$Z_3$	$Y_4$	$\frac{\dot{e}_{ш1} + i_{ш2}Z_1}{Z_1Y_2 + 1} + \frac{\dot{e}_{ш3} + i_{ш4}Z_3}{Z_3Y_4 + 1}$
		$Z_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{\dot{e}_{ш1} + i_{ш2}Z_1}{Z_1Y_2 + 1} + \frac{i_{ш3} + i_{ш4}}{Y_3 + Y_4}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{i_{ш1} + i_{ш2}}{Y_1 + Y_2} + \frac{i_{ш3} + i_{ш4}}{Y_3 + Y_4}$

Примечание:  $\dot{e}_{ш1} \geq \dot{e}_{ш11}$ ;  $\dot{e}_{ш2} \geq \dot{e}_{ш22}$ ;  $\dot{e}_{ш3} \geq \dot{e}_{ш33}$ ;  $\dot{e}_{ш4} \geq \dot{e}_{ш44}$ .

Таблица 3.2

№ пг.	Схема соединения	Тип элемента				Результирующая величина
		A	B	B	Г	
1		$Z_1$	$Z_2$	—	—	$\frac{\dot{e}_{ш1}Z_2 + \dot{e}_{ш2}Z_1}{Z_1Z_2}$
		$Z_1$	$Y_2$	—	—	$\frac{\dot{e}_{ш1}}{Z_1} + i_{ш2}$
		$Y_1$	$Y_2$	—	—	$i_{ш1} + i_{ш2}$
2		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	—	$\frac{(\dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2})Z_3 + \dot{e}_{ш3}(Z_1 + Z_2)}{(Z_1 + Z_2)Z_3}$
		$Z_1$	$Z_2$	$Y_3$	—	$\frac{\dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2}}{Z_1 + Z_2} + i_{ш3}$
		$Z_1$	$Y_2$	$Y_3$	—	$\frac{\dot{e}_{ш1}Y_2 + i_{ш2}}{Z_1Y_2 + 1} + i_{ш3}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	—	$\frac{i_{ш1}Y_2 + i_{ш2}Y_1}{Y_1 + Y_2} + i_{ш3}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Z_3$	—	$\frac{(i_{ш1}Y_2 + i_{ш2}Y_1)Z_3 + \dot{e}_{ш3}(Y_1 + Y_2)}{(Y_1 + Y_2)Z_3}$
		$Z_1$	$Y_2$	$Z_3$	—	$\frac{(\dot{e}_{ш1}Y_2 + i_{ш2})Z_3 + \dot{e}_{ш3}(Z_1Y_2 + 1)}{(Z_1Y_2 + 1)Z_3}$
3		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{\dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2}}{Z_1 + Z_2} + \frac{\dot{e}_{ш3} + \dot{e}_{ш4}}{Z_3 + Z_4}$
		$Y_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1} + \dot{e}_{ш2}Y_1}{Y_1Z_2 + 1} + \frac{\dot{e}_{ш3} + \dot{e}_{ш4}}{Z_3 + Z_4}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1}Y_2 + i_{ш2}Y_1}{Y_1 + Y_2} + \frac{\dot{e}_{ш3} + \dot{e}_{ш4}}{Z_3 + Z_4}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1}Y_2 + i_{ш2}Y_1}{Y_1 + Y_2} + \frac{i_{ш3} + \dot{e}_{ш4}Y_3}{Y_3Z_4 + 1}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{i_{ш1}Y_2 + i_{ш2}Y_1}{Y_1 + Y_2} + \frac{i_{ш3}Y_4 + i_{ш4}Y_3}{Y_3 + Y_4}$

Примечание:  $i_{ш1} \geq i_{шт1}$ ;  $i_{ш2} \geq i_{шт2}$ ;  $i_{ш3} \geq i_{шт3}$ ;  $i_{ш4} \geq i_{шт4}$ .

Ш Э	Схема соединения	Тип элемента				Результирующая величина	
		А	Б	В	Г	$i_{ш}$	
		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{\dot{e}_{ш4} (Z_2 Y_3 + 1) + [\dot{e}_{ш1} (Z_2 Y_3 + 1) + \dot{e}_{ш3} + i_{ш3} Z_2] Z_4}{(Z_2 Y_3 + 1) Z_4}$	
$Z_1$		$Y_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{[\dot{e}_{ш1} (Y_2 Z_3 + 1) + i_{ш3} Z_3] Z_4 + \dot{e}_{ш4} [Z_1 (Y_2 Z_3 + 1) + Z_3]}{[Z_1 (Y_2 Z_3 + 1) + Z_3] Z_4}$		
$Z_1$		$Y_2$	$Y_3$	$Z_4$	$\frac{[\dot{e}_{ш1} (Y_2 + Y_3) + i_{ш2} + i_{ш3}] Z_4 + \dot{e}_{ш4} [Z_1 (Y_2 + Y_3) + 1]}{[Z_1 (Y_2 + Y_3) + 1] Z_4}$		
$Z_1$		$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{\dot{e}_{ш1} (Y_2 + Y_3) + i_{ш2} + i_{ш3} + i_{ш4}}{Z_1 (Y_2 + Y_3) + 1}$		
$Y_1$		$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{i_{ш1} (Y_2 + Y_3) + i_{ш2} + i_{ш3} + i_{ш4}}{Y_2 + Y_3 + Y_3}$		
$Y_1$		$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1} (Z_2 + Z_3) + (\dot{e}_{ш2} Z_3 + \dot{e}_{ш3} Z_2) Y_1}{Z_2 (Y_1 Z_3 + 1) + Z_3} + \frac{\dot{e}_{ш4}}{Z_4}$		
$Y_1$		$Y_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1} (Y_2 Z_3 + 1) + (i_{ш2} Z_3 + \dot{e}_{ш3}) Y_1}{(Y_1 + Y_2) Z_3 + 1} + \frac{\dot{e}_{ш4}}{Z_4}$		
$Y_1$		$Y_2$	$Y_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1} (Y_2 + Y_3) + (i_{ш2} + i_{ш3}) Y_1}{Y_1 + Y_2 + Y_3} + \frac{\dot{e}_{ш4}}{Y_4}$		

№ стр.	Схема соединения	Тип элемента				Результующая величина	
		А	Б	В	Г	$i_{ш}$	$i_{ш}$
2		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{e_{ш1} + e_{ш2}}{Z_1 + Z_2} + \frac{e_{ш3} Z_4 + e_{ш4} Z_3}{Z_3 Z_4}$	
		$Y_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1} + e_{ш2} Y_1}{Y_1 Z_2 + 1} + \frac{e_{ш3} Z_4 + e_{ш4} Z_3}{Z_3 Z_4}$	
		$Y_1$	$Y_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1} Y_2 + i_{ш2} Y_1}{Y_1 + Y_2} + \frac{e_{ш3} Z_4 + e_{ш4} Z_3}{Z_3 Z_4}$	
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Z_4$	$\frac{(i_{ш1} Y_2 + i_{ш2} Y_1) Z_2 + e_{ш4} (Y_1 + Y_2)}{(Y_1 + Y_2) Z_4} + i_{ш3}$	
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{i_{ш1} Y_2 + i_{ш2} Y_1}{Y_1 + Y_2} + i_{ш3} + i_{ш4}$	
		$Z_1$	$Z_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{e_{ш1} + e_{ш2}}{Z_1 + Z_2} + i_{ш3} + i_{ш4}$	
		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Y_4$	$\frac{(e_{ш1} + e_{ш2}) Z_3 + e_{ш3} (Z_1 + Z_2)}{(Z_1 + Z_2) Z_3} + i_{ш4}$	
		$Y_1$	$Z_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{i_{ш1} + e_{ш2} Y_1}{Y_1 Z_2 + 1} + i_{ш3} + i_{ш4}$	

Таблица 3.4

Ш Э	Схема соединения	Т.л. элемента				Результующая величина
		А	Б	В	Г	
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\dot{e}_{ш1} + \frac{(\dot{e}_{ш2} + \dot{e}_{ш3})Z_4 + \dot{e}_{ш4}(Z_2 + Z_3)}{Z_2 + Z_3 + Z_4}$
		Y <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{i_{ш1}}{Y_1} + \frac{(\dot{e}_{ш2} + \dot{e}_{ш3})Z_2 + \dot{e}_{ш4}(Z_2 + Z_3)}{Z_2 + Z_3 + Z_4}$
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{i_{ш1}}{Y_1} + \frac{(\dot{e}_{ш2}Y_3 + i_{ш2})Z_4 + \dot{e}_{ш4}(Y_2Z_3 + 1)}{Y_2(Z_3 + Z_4) + 1}$
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{i_{ш1}}{Y_1} + \frac{(i_{ш2}Y_3 + i_{ш3}Y_2)Z_4 + \dot{e}_{ш4}(Y_2 + Y_3)}{Y_2(Y_3Z_4 + 1) + Y_3}$
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\frac{i_{ш1}}{Y_1} + \frac{i_{ш2}Y_3 + i_{ш3}Y_2 + i_{ш4}(Y_2 + Y_3)}{Y_2Y_3 + (Y_2 + Y_3)Y_4}$
		Z <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\dot{e}_{ш1} + \frac{i_{ш2}Y_3 + i_{ш3}Y_2 + i_{ш4}(Y_2 + Y_3)}{Y_2Y_3 + (Y_2 + Y_3)Y_4}$
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\dot{e}_{ш1} + \frac{\dot{e}_{ш2}Y_3 + i_{ш3} + i_{ш4}(Z_2Y_3 + 1)}{Y_3 + Y_4(Z_2Y_3 + 1)}$
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\dot{e}_{ш1} + \frac{\dot{e}_{ш2} + \dot{e}_{ш3} + i_{ш4}(Z_2 + Z_3)}{(Z_2 + Z_3)Y_4 + 1}$

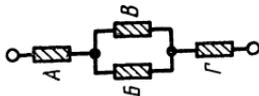
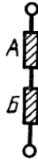
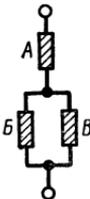
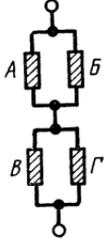
Ш №	Схема соединения	Тип элемента				Результирующая величина	
		А	Б	В	Г	$\dot{e}(P)$ ш	
2		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\dot{e}_{ш1} + \frac{\dot{e}_{ш2}Z_3 + \dot{e}_{ш3}Z_2}{Z_2 + Z_3} + \dot{e}_{ш4}$	
		$Y_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1}(Z_2 + Z_3) + (\dot{e}_{ш2}Z_3 + \dot{e}_{ш3}Z_2)Y_1}{Y_1(Z_2 + Z_3)} + \dot{e}_{ш4}$	
		$Y_1$	$Y_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1}(Y_2Z_3 + 1) + (\dot{e}_{ш2} + \dot{e}_{ш3}Z_3)Y_1}{Y_1(Y_2Z_3 + 1)} + \dot{e}_{ш4}$	
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Z_4$	$\frac{i_{ш1}(Y_2 + Y_3) + (i_{ш2} + i_{ш3})Y_1}{Y_1(Y_2 + Y_3)} + \dot{e}_{ш4}$	
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{(i_{ш1}Y_4 + i_{ш4}Y_1)(Y_1 + Y_4) + (i_{ш2} + i_{ш3})Y_1Y_4}{Y_1Y_4(Y_2 + Y_3)}$	
		$Z_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\dot{e}_{ш1} + \frac{(i_{ш2} + i_{ш3})Y_4 + i_{ш4}(Y_2 + Y_3)}{(Y_2 + Y_3)Y_4}$	
		$Z_1$	$Z_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\dot{e}_{ш1} + \frac{(\dot{e}_{ш2} + i_{ш3}Z_2)Y_4 + i_{ш4}(Z_2Y_3 + 1)}{(Z_2Y_3 + 1)Y_4}$	
		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Y_4$	$\dot{e}_{ш1} + \frac{(\dot{e}_{ш2}Z_3 + \dot{e}_{ш3}Z_2)Y_4 + i_{ш4}(Z_2 + Z_3)}{(Z_2 + Z_3)Y_4}$	

Таблица 3.5

№ пп.	Схема соединения	Тип элемента				Результирующая величина
		А	Б	В	Г	
1		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>			$R_{ш1} + R_{ш2}$
		Z <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>			$R_{ш1} + \frac{G_{ш2}}{ Y_2 ^2}$
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>			$\frac{G_{ш1} Y_2 ^2 + G_{ш2} Y_1 ^2}{ Y_1Y_2 ^2}$
2		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>		$R_{ш1} + \frac{R_{ш2} Z_3 ^2 + R_{ш3} Z_2 ^2}{ Z_2 + Z_3 ^2}$
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>		$R_{ш1} + \frac{R_{ш2} + G_{ш3} Z_3 }{ Z_2Y_3 + 1 ^2}$
		Z <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>		$R_{ш1} + \frac{G_{ш2} + G_{ш3}}{ Y_2 + Y_3 ^2}$
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>		$\frac{G_{ш1} Y_2 + Y_3 ^2 + (G_{ш2} + G_{ш3}) Y_1 ^2}{ (Y_2 + Y_3)Y_1 ^2}$
		Y <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>		$\frac{G_{ш1} Z_2 + Z_3 ^2 + (R_{ш2} Z_3 ^2 + R_{ш3} Z_2 ^2) Y_1 ^2}{ (Z_2 + Z_3)Y_1 ^2}$
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>		$\frac{G_{ш1} Y_2Z_3 + 1 ^2 + (G_{ш2} Z_3 ^2 + R_{ш3}) Y_1 ^2}{ Y_1(Y_2Z_3 + 1) ^2}$
3		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{R_{ш1} Z_2 ^2 + R_{ш2} Z_1 ^2}{ Z_1 + Z_2 ^2} + \frac{R_{ш3} Z_4 ^2 + R_{ш4} Z_3 ^2}{ Z_3 + Z_4 ^2}$
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\frac{R_{ш1} Z_2 ^2 + R_{ш2} Z_1 ^2}{ Z_1 + Z_2 ^2} + \frac{R_{ш3} + G_{ш4} Z_3 ^2}{ Z_3Y_4 + 1 ^2}$
		Z <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\frac{R_{ш1} + G_{ш2} Z_1 ^2}{ Z_1Y_2 + 1 ^2} + \frac{R_{ш3} + G_{ш4} Z_3 ^2}{ Z_3Y_4 + 1 ^2}$
		Z <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\frac{R_{ш1} + G_{ш2} Z_1 ^2}{ Z_1Y_2 + 1 ^2} + \frac{G_{ш3} + G_{ш4}}{ Y_3 + Y_4 ^2}$
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\frac{G_{ш1} + G_{ш2}}{ Y_1 + Y_2 ^2} + \frac{G_{ш3} + G_{ш4}}{ Y_3 + Y_4 ^2}$

Примечание:  $R_{ш1} \geq R_1$ ;  $R_{ш2} \geq R_2$ ;  $R_{ш3} \geq R_3$ ;  $R_{ш4} \geq R_4$ .

Таблица 3.6

№ пп.	Схема соединения	Тип элемента				Результирующая величина $G_{шн}^{(P)}$
		A	Б	В	Г	
1		$Z_1$	$Z_2$	—	—	$\frac{R_{ш1}  Z_2 ^2 + R_{ш2}  Z_1 ^2}{ Z_1 Z_2 ^2}$
		$Z_1$	$Y_2$	—	—	$\frac{R_{ш1}}{ Z_1 ^2} + G_{ш2}$
		$Y_1$	$Y_2$	—	—	$G_{ш1} + G_{ш2}$
2		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	—	$\frac{(R_{ш1} + R_{ш2})  Z_3 ^2 + R_{ш3}  Z_1 + Z_2 ^2}{ (Z_1 + Z_2) Z_3 ^2}$
		$Z_1$	$Z_2$	$Y_3$	—	$\frac{R_{ш1} + R_{ш2}}{ Z_1 + Z_2 ^2} + G_{ш3}$
		$Z_1$	$Y_2$	$Y_3$	—	$\frac{R_{ш1}  Y_2 ^2 + G_{ш2}}{ Z_1 Y_2 + 1 ^2} + G_{ш3}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	—	$\frac{G_{ш1}  Y_2 ^2 + G_{ш2}  Y_1 ^2}{ Y_1 + Y_2 ^2} + G_{ш3}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Z_3$	—	$\frac{(G_{ш1}  Y_2 ^2 + G_{ш2}  Y_1 ^2)  Z_3 ^2 + R_{ш3}  Y_1 + Y_2 ^2}{ (Y_1 + Y_2) Z_3 ^2}$
		$Z_1$	$Y_2$	$Z_3$	—	$\frac{(R_{ш1}  Y_2 ^2 + G_{ш2})  Z_3 ^2 + R_{ш3}  Z_1 Y_2 + 1 ^2}{ (Z_1 Y_2 + 1) Z_3 ^2}$
3		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{R_{ш1} + R_{ш2}}{ Z_1 + Z_2 ^2} + \frac{R_{ш3} + R_{ш4}}{ Z_3 + Z_4 ^2}$
		$Y_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{G_{ш1} + R_{ш2}  Y_1 ^2}{ Y_1 Z_2 + 1 ^2} + \frac{R_{ш3} + R_{ш4}}{ Z_3 + Z_4 ^2}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{G_{ш1}  Y_2 ^2 + G_{ш2}  Y_1 ^2}{ Y_1 + Y_2 ^2} + \frac{R_{ш3} + R_{ш4}}{ Z_3 + Z_4 ^2}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Z_4$	$\frac{G_{ш1}  Y_2 ^2 + G_{ш2}  Y_1 ^2}{ Y_1 + Y_2 ^2} + \frac{G_{ш3} + R_{ш4}  Y_3 ^2}{ Y_3 Z_4 + 1 ^2}$
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{G_{ш1}  Y_2 ^2 + G_{ш2}  Y_1 ^2}{ Y_1 + Y_2 ^2} + \frac{G_{ш3}  Y_4 ^2 + G_{ш4}  Y_3 ^2}{ Y_3 + Y_4 ^2}$

Примечание:  $G_{ш1} \geq G_1$ ;  $G_{ш2} \geq G_2$ ;  $G_{ш3} \geq G_3$ ;  $G_{ш4} \geq G_4$ .

III	IV	Схема соединения	Тип элемента				Результующая величина	
			A	B	B	Г	$R(\Pi)$ $Z_{\Pi}$	
			$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$R_{\text{ш1}} + \frac{(R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}})  Z_4 ^2 + R_{\text{ш4}}  Z_2 + Z_3 ^2}{ Z_2 + Z_3 + Z_4 ^2}$	
	$Y_1$		$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{G_{\text{ш1}}}{ Y_1 ^2} + \frac{(R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}})  Z_2 ^2 + R_{\text{ш4}}  Z_2 + Z_3 ^2}{ Z_2 + Z_3 + Z_4 ^2}$		
	$Y_1$		$Y_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{G_{\text{ш1}}}{ Y_1 ^2} + \frac{(R_{\text{ш3}}  Y_2 ^2 + G_{\text{ш2}})  Z_4 ^2 + R_{\text{ш4}}  Y_2 Z_3 + 1 ^2}{ Y_2 (Z_3 + Z_4) + 1 ^2}$		
	$Y_1$		$Y_2$	$Y_3$	$Z_4$	$\frac{G_{\text{ш1}}}{ Y_1 ^2} + \frac{(G_{\text{ш2}}  Y_3 ^2 + G_{\text{ш3}}  Y_2 ^2)  Z_4 ^2 + R_{\text{ш4}} (Y_2 + Y_3)^2}{ Y_2 (Y_3 Z_4 + 1) + Y_3 ^2}$		
	$Y_1$		$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{G_{\text{ш1}}}{ Y_1 ^2} + \frac{G_{\text{ш2}}  Y_3 ^2 + G_{\text{ш3}}  Y_2 ^2 + G_{\text{ш4}} (Y_2 + Y_3)^2}{ Y_2 Y_3 + (Y_2 + Y_3) Y_4 ^2}$		
	$Z_1$		$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$R_{\text{ш1}} + \frac{G_{\text{ш2}}  Y_3 ^2 + G_{\text{ш3}}  Y_2 ^2 + G_{\text{ш4}}  Y_2 + Y_3 ^2}{ Y_2 Y_3 + (Y_2 + Y_3) Y_4 ^2}$		
	$Z_1$		$Z_2$	$Y_3$	$Y_4$	$R_{\text{ш1}} + \frac{R_{\text{ш2}}  Y_3 ^2 + G_{\text{ш3}} + G_{\text{ш4}}  Z_2 Y_3 + 1 ^2}{ Y_3 + Y_4 (Z_2 Y_3 + 1) ^2}$		
	$Z_1$		$Z_2$	$Z_3$	$Y_4$	$R_{\text{ш1}} + \frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}} + G_{\text{ш4}}  Z_2 + Z_3 ^2}{ (Z_2 + Z_3) Y_4 + 1 ^2}$		

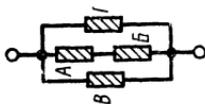
I

№ пп.	Схема соединения	Тип элемента				Результирующая величина	
		A	B	B	Г	$R_{III}^{(P)}$	
2		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$R_{III} + \frac{R_{III2}  Z_3 ^2 + R_{III3}  Z_2 ^2}{ Z_2 + Z_3 ^2} + R_{III4}$	
		Y <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{G_{III1}  Z_2 + Z_3 ^2 + (R_{III2}  Z_3 ^2 + R_{III3}  Z_2 ^2) Y_1^2}{ Y_1 (Z_2 + Z_3) ^2} + R_{III4}$	
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{G_{III1}  Y_{2-3} + 1 ^2 + (R_{III3} + G_{III2}  Z_3 ^2)  Y_1 ^2}{ Y_1 (Y_2 Z_3 + 1) ^2} + R_{III4}$	
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{G_{III1}  Y_2 + Y_3 ^2 + (G_{III2} + G_{III3})  Y_1 ^2}{ Y_1 (Y_2 + Y_3) ^2} + R_{III4}$	
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\frac{(G_{III1}  Y_4 ^2 + G_{III4}  Y_1 ^2)  Y_1 + Y_2 ^2 + (G_{III2} + G_{III3})  Y_1 Y_4 ^2}{ Y_1 Y_4 (Y_2 + Y_3) ^2}$	
		Z <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$R_{III1} + \frac{(G_{III2} + G_{III3})  Y_4 ^2 + G_{III4}  Y_2 + Y_3 ^2}{ (Y_2 + Y_3) Y_4 ^2}$	
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$R_{III1} + \frac{(R_{III2} + G_{III3}  Z_2 ^2)  Y_4 ^2 + G_{III4}  Z_2 Y_3 + 1 ^2}{ Z_2 Y_3 + 1  Y_4^2}$	
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$R_{III1} + \frac{(R_{III2}  Z_3 ^2 + R_{III3}  Z_2 ^2)  Y_4 ^2 + G_{III4}  Z_2 + Z_3 ^2}{ (Z_2 + Z_3) Y_4 ^2}$	

Таблица 3.8

№	Схема соединения	Тип элемента				Результующая величина	
		А	Б	В	Г	$G_{III}^{(P)}$	
1		$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{R_{III4}   Z_2 Y_3 + 1 ^2 + (R_{III1}   Z_2 Y_3 + 1 ^2 + R_{III2} + G_{III3}   Z_2 ^2)   Z_4 ^2}{  (Z_2 Y_3 + 1) Z_4 ^2}$	
		$Z_1$	$Y_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{(R_{III1}   Y_2 Z_3 + 1 ^2 + G_{III3}   Z_3 ^2) Z_4 ^2 + R_{III4} (  Z_1   (Y_2 Z_3 + 1) + Z_3)^2}{  Z_1 (Y_2 Z_3 + 1) + Z_3   Z_4 ^2}$	
		$Z_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Z_4$	$\frac{(R_{III1}   Y_2 + Y_3 ^2 + G_{III2} + G_{III3})   Z_4 ^2 + R_{III4}   Z_1 (Y_2 + Y_3) + 1 ^2}{  Z_1 (Y_2 + Y_3) + 1   Z_4 ^2}$	
		$Z_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{R_{III1}   Y_2 + Y_3 ^2 + G_{III2} + G_{III3}}{  Z_1 (Y_2 + Y_3) + 1 ^2}$	
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$\frac{G_{III1}   Y_2 + Y_3 ^2 + G_{III2} + G_{III3}}{  Y_1 + Y_2 + Y_3 ^2}$	
		$Y_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{G_{III1}   Z_2 + Z_3 ^2 + (R_{III2}   Z_3 ^2 + R_{III3}   Z_2 ^2)   Y_1 ^2}{  Z_2 (Y_1 Z_3 + 1) + Z_3 ^2} + \frac{R_{III4}}{  Z_4 ^2}$	
		$Y_1$	$Y_2$	$Z_3$	$Z_4$	$\frac{G_{III1}   Y_2 Z_3 + 1 ^2 + (G_{III2}   Z_3 ^2 + R_{III3}) G_{III1}}{  (Y_1 + Y_2) Z_3 + 1 ^2} + \frac{R_{III4}}{  Z_4 ^2}$	
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Z_4$	$\frac{G_{III1}   Y_2 + Y_3 ^2 + (G_{III2} + G_{III3})   Y_1 ^2}{  Y_1 + Y_2 + Y_3 ^2} + \frac{R_{III4}}{  Z_4 ^2}$	

№ пп.	Схема соед. нел.:я	Тип элемента				Результующая величина $G^{(p)}$ <sub>ш</sub>
		A	B	B	Г	
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{R_{ш1} + R_{ш2}}{ Z_1 + Z_2 ^2} + \frac{R_{ш3}  Z_4 ^2 + R_{ш4}  Z_3 ^2}{ Z_3 Z_4 ^2}$
		Y <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{G_{ш1} + R_{ш2}  Y_1 ^2}{ Y_1 Z_2 + 1 ^2} + \frac{R_{ш3}  Z_4 ^2 + R_{ш4}  Z_3 ^2}{ Z_3 Z_4 ^2}$
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{G_{ш1}  Y_2 ^2 + G_{ш2}  Y_1 ^2}{ Y_1 + Y_2 ^2} + \frac{R_{ш3}  Z_4 ^2 + R_{ш4}  Z_3 ^2}{ Z_3 Z_4 ^2}$
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	$\frac{(G_{ш1}  Y_2 ^2 + G_{ш2}  Y_1 ^2)  Z_2 ^2 + R_{ш3}  Y_1 + Y_2 ^2}{ (Y_1 + Y_2) Z_4 ^2} + G_{ш3}$
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\frac{G_{ш1}  Y_2 ^2 + G_{ш2}  Y_1 ^2}{ Y_1 + Y_2 ^2} + G_{ш3} + G_{ш4}$
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\frac{R_{ш1} + R_{ш2}}{ Z_1 + Z_2 ^2} + G_{ш3} + G_{ш4}$
		Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\frac{(R_{ш1} + R_{ш2})  Z_3 ^2 + R_{ш3}  Z_1 + Z_2 ^2}{ (Z_1 + Z_2) Z_3 ^2} + G_{ш4}$
		Y <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	$\frac{G_{ш1} + R_{ш2}  Y_1 ^2}{ Y_1 Z_2 + 1 ^2} + G_{ш3} + G_{ш4}$



## ШУМЯЩИЙ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК

## 4.1. СИСТЕМЫ ПАРАМЕТРОВ

**Ш**умящий четырехполюсник (рис. 4.1) относится к категории автономных и отличается от нешумящего (неавтономного) наличием шумовых токов и напряжений между выводами при отключенном источнике сигнала, возникающих под влиянием внутренних флуктуаций [26, 35, 74, 83].

Используя зависимости между токами и напряжениями в автономном четырехполюснике [35], заменив в них обобщенные автономные величины соответствующими шумовыми токами и

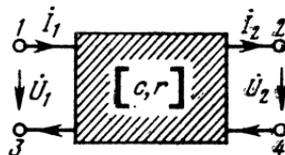


Рис. 4.1. Шумящий линейный четырехполюсник

напряжениями, получим для шумящего четырехполюсника (рис.

4.1) основные системы параметров (рис. 4.2). Из них следует, что шумящий четырехполюсник характеризуется шестью независимыми величинами, четыре из которых — сигнальные параметры и две — шумовые токи напряжения.

Уравнения шумящего четырехполюсника, имея в виду последующее использование теории матриц, запишем в форме

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} &= a \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{e}_{ma} \\ \dot{i}_{ma} \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} &= b \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{e}_{mb} \\ \dot{i}_{mb} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} &= h \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{e}_{mh} \\ \dot{i}_{mh} \end{bmatrix}; & \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} &= f \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{i}_{mf} \\ \dot{e}_{mf} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} &= z \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{e}_{mz1} \\ \dot{e}_{mz2} \end{bmatrix}, & & (4.1) \\ \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} &= y \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{i}_{my1} \\ \dot{i}_{my2} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

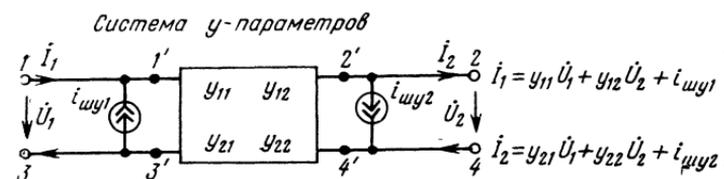
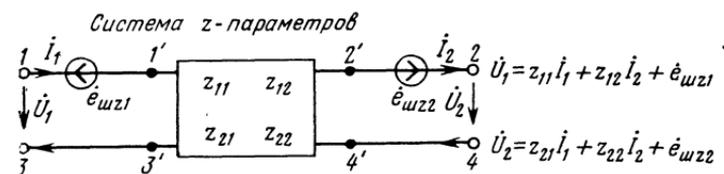
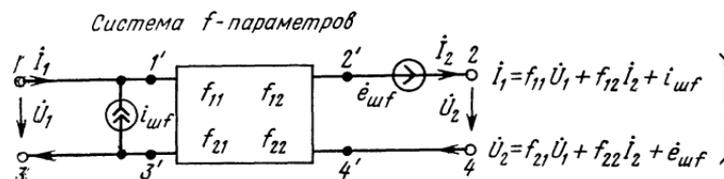
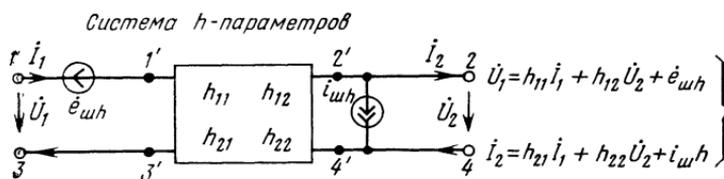
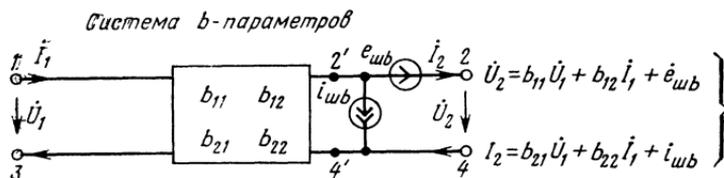
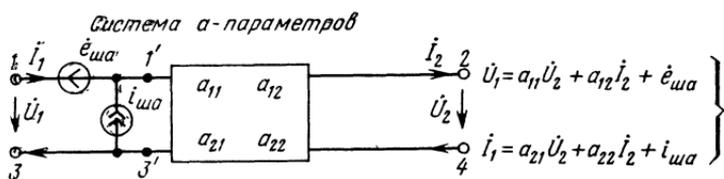


Рис. 4.2. Системы параметров линейного шумящего четырех-полюсника

где

$$\begin{aligned} a &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, & b &= \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}, & h &= \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}, \\ f &= \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix}, & z &= \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}, & y &= \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Уравнения четырехполюсника, отображающего сигнальные свойства, получаются из (4.1) исключением слагаемых, содержащих шумовые величины.

Необратимый шумящий четырехполюсник характеризуется четырьмя сигнальными параметрами, а обратимый — тремя. Признаком обратимости шумящего четырехполюсника является выполнение любого из равенств:  $\Delta a = 1$ ,  $\Delta b = 1$ ,  $h_{12} = h_{21}$ ,  $f_{12} = f_{21}$ ,  $z_{12} = -z_{21}$ ,  $y_{12} = -y_{21}$ . Число шумовых величин, входящих в уравнения этих четырехполюсников, остается неизменным и равным двум. В общем случае между источниками шума существует корреляционная связь, которую необходимо учитывать при определении влияния внутренних флуктуаций четырехполюсника на отношение сигнал/шум [17, 25, 74, 83].

Между шумовыми токами и напряжениями различных систем параметров четырехполюсника существует строгая взаимосвязь, которая определяется соотношениями табл. 4.1. Соотношения между сигнальными параметрами даны в табл. П.1 и вспомогательных величин — в табл. П.2 (приложения).

Принцип определения сигнальных параметров шумящего четырехполюсника в различных системах поясняется рис. 4.3.

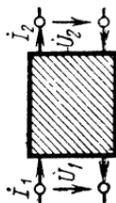
Использование приведенных соотношений требует определения шумовых составляющих, которые обычно незначительны по величине. Поэтому на практике ими пренебрегают, выбирая сигнальные составляющие, значительно превышающими шумовые. Сигнальные параметры тогда определяются по методике, применяемой для неавтономных четырехполюсников.

Шумовые токи и напряжения, входящие в уравнения шумящего четырехполюсника, измеряются также в режиме холостого хода и короткого замыкания. Исключение составляют шумовые величины в системах  $a$ - и  $b$ -параметров, токи и напряжения которых не могут быть непосредственно измерены и поэтому определяются только расчетным путем.

88 Таблица 4.1

Величина						z	y
	a	b	h	f			
$\dot{e}_{ma}$	—	$-\frac{b_{22}}{\Delta} \dot{e}_{mb} + \frac{b_{12}}{\Delta} \dot{e}_{mb}$	$\dot{e}_{mh} - \frac{h_{11}}{h_{21}} \dot{e}_{mh}$	$-\frac{1}{f_{21}} \dot{e}_{mf}$	$\dot{e}_{mz1} - \frac{z_{11}}{z_{21}} \dot{e}_{mz2}$	$-\frac{1}{y_{21}} \dot{e}_{my2}$	
$i_{ma}$	—	$\frac{b_{21}}{\Delta} \dot{e}_{mb} - \frac{b_{11}}{\Delta} \dot{e}_{mb}$	$-\frac{1}{h_{21}} i_{mh}$	$-\frac{f_{11}}{f_{21}} \dot{e}_{mf} + i_{mf}$	$-\frac{1}{z_{21}} \dot{e}_{mz2}$	$\frac{y_{11}}{y_{21}} i_{my1} - \frac{1}{y_{21}} i_{my2}$	
$\dot{e}_{mb}$	$-\frac{a_{22}}{\Delta} \dot{e}_{ma} + \frac{a_{12}}{\Delta} \dot{e}_{ma}$	—	$-\frac{1}{h_{12}} \dot{e}_{mh}$	$\dot{e}_{mf} - \frac{f_{32}}{f_{12}} i_{mf}$	$-\frac{z_{22}}{z_{12}} \dot{e}_{mz1} + \dot{e}_{mz2}$	$-\frac{1}{y_{12}} i_{my1}$	
$i_{mb}$	$\frac{a_{21}}{\Delta} \dot{e}_{ma} - \frac{a_{11}}{\Delta} \dot{e}_{ma}$	—	$-\frac{h_{22}}{h_{21}} \dot{e}_{mh} + i_{mh}$	$-\frac{1}{f_{12}} i_{mf}$	$-\frac{1}{z_{12}} \dot{e}_{mz1}$	$-\frac{y_{22}}{y_{12}} i_{my1} + i_{my2}$	
$\dot{e}_{mh}$	$\dot{e}_{ma} - \frac{a_{12}}{a_{22}} \dot{e}_{ma}$	$-\frac{1}{b_{11}} \dot{e}_{mb}$	—	$\frac{f_{12}}{\Delta} \dot{e}_{mf} - \frac{f_{21}}{\Delta} i_{mf}$	$\dot{e}_{mz1} - \frac{z_{12}}{z_{22}} \dot{e}_{mz2}$	$-\frac{1}{y_{11}} i_{my1}$	
$i_{mh}$	$-\frac{1}{a_{22}} i_{ma}$	$-\frac{b_{21}}{b_{11}} \dot{e}_{mb} + i_{mb}$	—	$-\frac{f_{11}}{\Delta} \dot{e}_{mf} + \frac{f_{21}}{\Delta} i_{mf}$	$-\frac{1}{z_{22}} \dot{e}_{mz2}$	$-\frac{y_{21}}{y_{11}} i_{my1} + i_{my2}$	
$\dot{e}_{mf}$	$-\frac{1}{a_{11}} \dot{e}_{ma}$	$\dot{e}_{mb} - \frac{b_{12}}{b_{22}} \dot{e}_{mb}$	$\frac{h_{21}}{\Delta} \dot{e}_{mh} - \frac{h_{11}}{\Delta} i_{mh}$	—	$-\frac{z_{21}}{z_{11}} \dot{e}_{mz1} + \dot{e}_{mz2}$	$-\frac{1}{y_{22}} i_{my2}$	

Продолжение табл. 4.1



Величина	a	b	h	f	z	y
$i_{mf}$	$-\frac{a_{21}}{a_{11}} \cdot e_{ша} + i_{ша}$	$-\frac{1}{b_{22}} i_{mb}$	$-\frac{h_{22}}{\Delta h} \cdot e_{mh} + \frac{h_{12}}{\Delta h} i_{mh}$	—	$-\frac{1}{z_{11}} \cdot e_{mz1}$	$i_{my1} - \frac{y_{12}}{y_{22}} i_{my2}$
$i_{mz1}$	$i_{ша} - \frac{a_{11}}{a_{21}} i_{ша}$	$-\frac{1}{b_{21}} i_{mb}$	$i_{mh} - \frac{h_{12}}{h_{22}} i_{mh}$	$-\frac{1}{f_{11}} i_{mf}$	—	$-\frac{y_{22}}{\Delta y} i_{my1} + \frac{y_{12}}{\Delta y} i_{my2}$
$i_{mz2}$	$-\frac{1}{a_{21}} i_{ша}$	$i_{mb} - \frac{b_{11}}{b_{21}} i_{mb}$	$-\frac{1}{h_{22}} i_{mh}$	$i_{mf} - \frac{f_{21}}{f_{11}} i_{mf}$	—	$\frac{y_{21}}{\Delta y} i_{my1} - \frac{y_{11}}{\Delta y} i_{my2}$
$i_{my1}$	$-\frac{a_{22}}{a_{12}} \cdot e_{ша} + i_{ша}$	$-\frac{1}{b_{12}} \cdot e_{mb}$	$-\frac{1}{h_{11}} \cdot e_{mh}$	$-\frac{f_{12}}{f_{22}} \cdot e_{mf} + i_{mf}$	$-\frac{z_{22}}{\Delta z} \cdot e_{mz1} + \frac{z_{12}}{\Delta z} \cdot e_{mz2}$	—
$i_{my2}$	$-\frac{1}{a_{12}} \cdot e_{ша}$	$\frac{b_{22}}{b_{12}} \cdot e_{mb} - i_{mb}$	$-\frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot e_{mh} + i_{mh}$	$-\frac{1}{f_{22}} \cdot e_{mf}$	$\frac{z_{21}}{\Delta z} \cdot e_{mz1} - \frac{z_{11}}{\Delta z} \cdot e_{mz2}$	—

Примечание:  $\Delta a = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$ ;  $\Delta h = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}$ ;  $\Delta z = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$ ;  
 $\Delta b = b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}$ ;  $\Delta y = y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}$ .

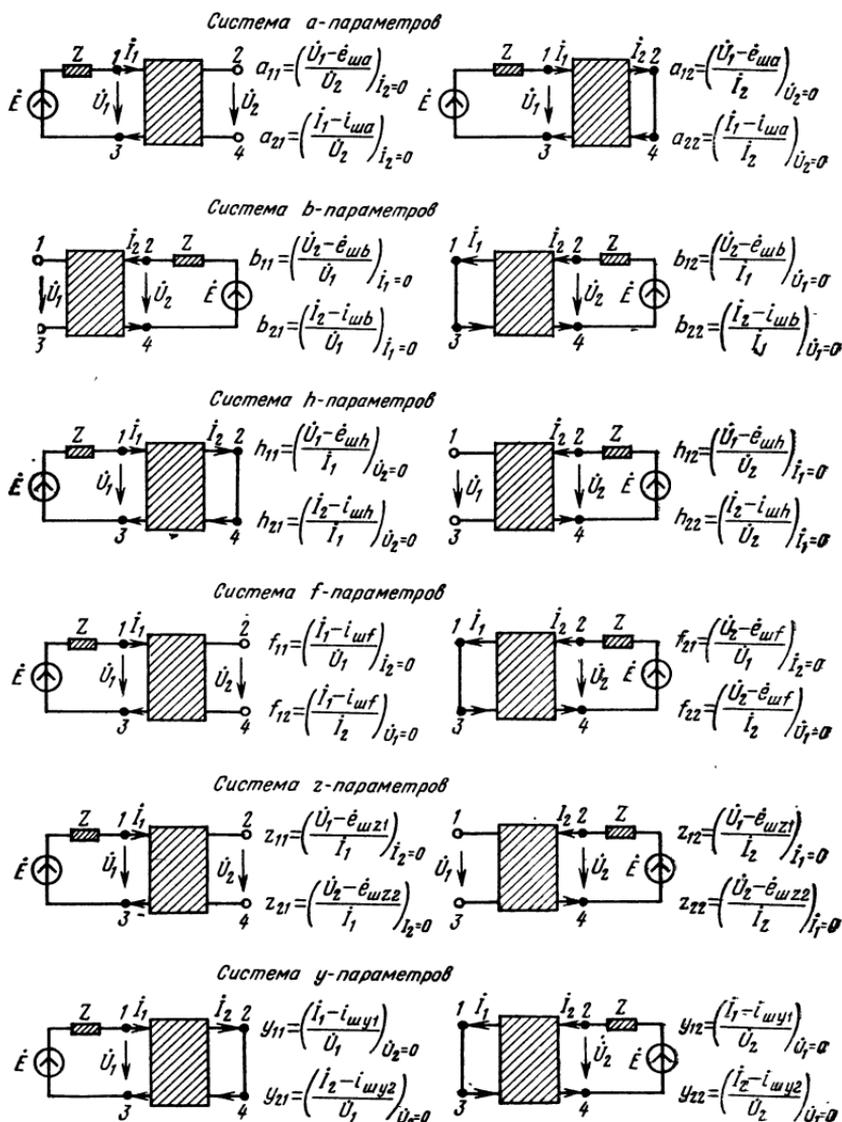


Рис. 4.3. Определение сигнальных параметров шумящего линейного четырехполюсника

Примечание. Равенства  $\dot{U}_1=0$  и  $\dot{U}_2=0$  указывают на короткое замыкание выводов четырехполюсника соответственно слева и справа, а  $\dot{I}_1=0$  и  $\dot{I}_2=0$  — на режим холостого хода.

Выбор той или иной системы параметров основывается на чисто практических соображениях и обуславливается, в частности, возможностями непосредственного измерения, которые определяются степенью сложности осуществления режимов короткого замыкания и холостого хода. В первом приближении обычно считают, что режим холостого хода легко достижим для низкоомных цепей, а короткого замыкания — для высокоомных. В реальных условиях невозможно получить идеальные режимы ( $Z_K=0$  и  $Z_X=\infty$ ), поэтому считают эти режимы обеспеченными при выполнении неравенств  $|Z| \ll |Z'_x|$  и  $|Z| \gg |Z'_K|$ , где  $Z$  — сопротивление между выводами четырехполюсника. Приведенные соображения подтверждаются примерами из практики — выбором для биполярных транзисторов системы  $h$ -параметров, для униполярных —  $y$ -параметров и, наконец,  $f$ -параметров — для операционных усилителей [56, 77, 88].

При анализе свойств шумящего четырехполюсника обычно исходят из предположения, что сигнал передается слева направо (в «прямом» направлении), вместе с тем, передача через четырехполюсник может осуществляться и справа налево (в «обратном» направлении). Оба направления передачи, в принципе, равноправны, и отдаваемое предпочтение одному из них весьма условно. Поэтому рассмотрим шумящий четырехполюсник при передаче сигнала справа налево. Это необходимо для обобщенного анализа шумовых свойств системы передачи и расчета шумов в сложных соединениях четырехполюсников.

На рис. 4.4 представлен шумящий четырехполюсник, на котором указаны принятые направления токов и на-

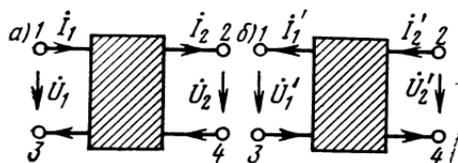


Рис. 4.4. Шумящий четырехполюсник при передаче сигнала: а) справа налево, б) слева направо

пряжений при передаче сигнала слева направо и справа налево. Сигнальные токи и напряжения для обратного направления помечены штрихом сверху у соответствующего индекса.

Напряжения на входе (справа) и выходе (слева) не изменяют вначале принятые направления, токи же изменяют их на обратные. Учитывая это, на основе известных из теории автономного четырехполюсника соотношений запишем сигнальные и шумовые матрицы:

$$a' = \Delta a^{-1} \begin{bmatrix} a_{22} & a_{12} \\ a_{21} & a_{11} \end{bmatrix}, \quad r'_a = \Delta a^{-1} \begin{bmatrix} -a_{22} \dot{e}_{ma} + a_{12} i_{ma} \\ -a_{21} \dot{e}_{ma} + a_{11} i_{ma} \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

$$b' = \Delta b^{-1} \begin{bmatrix} b_{22} & b_{12} \\ b_{21} & b_{11} \end{bmatrix}, \quad r'_b = \Delta b^{-1} \begin{bmatrix} -b_{22} \dot{e}_{mb} + b_{12} i_{mb} \\ -b_{21} \dot{e}_{mb} + b_{11} i_{mb} \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

$$h' = \Delta h^{-1} \begin{bmatrix} h_{22} & h_{12} \\ h_{21} & h_{11} \end{bmatrix}, \quad r'_h = \Delta h^{-1} \begin{bmatrix} -h_{22} \dot{e}_{mh} + h_{12} i_{mh} \\ -h_{21} \dot{e}_{mh} + h_{11} i_{mh} \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

$$f' = \Delta f^{-1} \begin{bmatrix} f_{22} & f_{12} \\ f_{21} & f_{11} \end{bmatrix}, \quad r'_f = \Delta f^{-1} \begin{bmatrix} -f_{22} \dot{e}_{mf} + f_{12} i_{mf} \\ -f_{21} \dot{e}_{mf} + f_{11} i_{mf} \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

$$z' = \begin{bmatrix} -z_{22} & -z_{21} \\ -z_{12} & -z_{11} \end{bmatrix}, \quad r'_z = \begin{bmatrix} \dot{e}_{mz2} \\ \dot{e}_{mz1} \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

$$y' = \begin{bmatrix} -y_{22} & -y_{21} \\ -y_{12} & -y_{11} \end{bmatrix}, \quad r'_y = \begin{bmatrix} -i_{my2} \\ -i_{my1} \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Из (4.3)—(4.8) видно, что параметры неизвестного шумящего четырехполюсника, представляющего зеркальные отображения шумящего четырехполюсника с известными параметрами, легко находятся по последним.

При разделении сложной шумящей цепи на простые четырехполюсники, применяемом для упрощения анализа и расчета сигнальных и шумовых показателей, часто встречается скрещивание выводов. Необходимым оно оказывается и при обратном процессе — построении сложных структур из отдельных четырехполюсников. Если скрещиваются левые выводы шумящего четырехполюсника (рис. 4.5а), то ток  $I_1$  и напряжение  $U_1$  в точках 1, 3 изменяют направление, поэтому

$$\left. \begin{aligned} -\dot{U}_1 &= a_{11} \dot{U}_2 + a_{12} \dot{I}_2 + \dot{e}_{m a'} \\ -\dot{I}_1 &= a_{21} \dot{U}_2 + a_{22} \dot{I}_2 + i_{m a} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-a_{11})\dot{U}_2 + (-a_{12})\dot{I}_2 + (-\dot{e}_{ша}), \\ \dot{I}_2 &= (-a_{21})\dot{U}_2 + (-a_{22})\dot{I}_2 + (-\dot{i}_{ша}), \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

все сигнальные  $a$ -параметры, шумовое напряжение  $\dot{e}_{ша}$  и ток  $\dot{i}_{ша}$  меняют знак на противоположный.

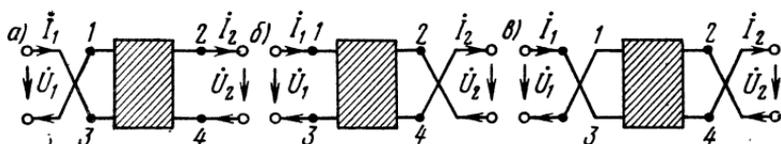


Рис. 4.5. Скрещенный шумящий четырехполюсник:  
а) слева, б) справа, в) слева и справа

Если скрещиваются правые выводы (рис. 4.5б), то ток  $\dot{I}_2$  и напряжение  $\dot{U}_2$  изменяют направление, отсюда

$$\left. \begin{aligned} -\dot{U}_2 &= b_{11}\dot{U}_1 + b_{12}\dot{I}_1 + \dot{e}_{шб}, \\ -\dot{I}_2 &= b_{21}\dot{U}_1 + b_{22}\dot{I}_1 + \dot{i}_{шб} \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_2 &= (-b_{11})\dot{U}_1 + (-b_{12})\dot{I}_1 + (-\dot{e}_{шб}), \\ \dot{I}_2 &= (-b_{21})\dot{U}_1 + (-b_{22})\dot{I}_1 + (-\dot{i}_{шб}), \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

все сигнальные  $b$ -параметры, шумовое напряжение  $\dot{e}_{шб}$  и ток  $\dot{i}_{шб}$  изменяют знак на противоположный.

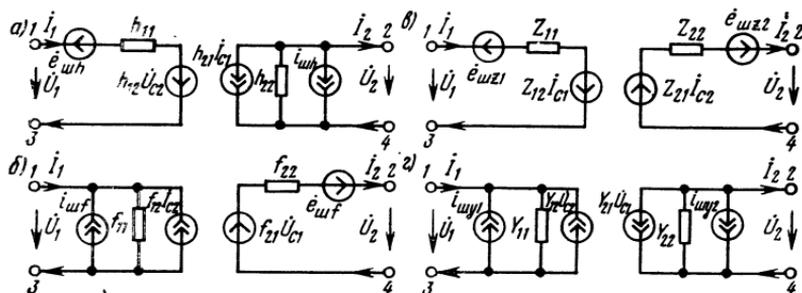


Рис. 4.6. Схемы замещения шумящего линейного четырехполюсника в системах параметров:  
а)  $h$ , б)  $f$ , в)  $z$ , г)  $y$

Пользуясь пересчетными соотношениями табл. П.1, несложно найти перемены в знаках и в других системах

параметров. В результате выявляются следующие зависимости между сигнальными параметрами и шумовыми величинами в скрещенном шумящем четырехполюснике по сравнению с исходным:

$$a^* = \begin{bmatrix} -a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & -a_{22} \end{bmatrix}, \quad r_a^* = \begin{bmatrix} \mp \dot{e}_{ш a} \\ \mp i_{ш a} \end{bmatrix}; \quad (4.13)$$

$$b^* = \begin{bmatrix} -b_{11} & -b_{12} \\ -b_{21} & -b_{22} \end{bmatrix}, \quad r_b^* = \begin{bmatrix} \mp \dot{e}_{ш b} \\ \mp i_{ш b} \end{bmatrix}; \quad (4.14)$$

$$h^* = \begin{bmatrix} h_{11} & -h_{12} \\ -h_{21} & -h_{22} \end{bmatrix}, \quad r_h^* = \begin{bmatrix} \mp \dot{e}_{ш h} \\ \pm i_{ш h} \end{bmatrix}; \quad (4.15)$$

$$f^* = \begin{bmatrix} f_{11} & -f_{12} \\ -f_{21} & -f_{22} \end{bmatrix}, \quad r_f^* = \begin{bmatrix} \pm e_{ш f} \\ \mp i_{ш f} \end{bmatrix}; \quad (4.16)$$

$$z^* = \begin{bmatrix} z_{11} & -z_{12} \\ -z_{21} & -z_{22} \end{bmatrix}, \quad r_z^* = \begin{bmatrix} \mp \dot{e}_{ш z 1} \\ \pm \dot{e}_{ш z 2} \end{bmatrix}; \quad (4.17)$$

$$y^* = \begin{bmatrix} y_{11} & -y_{12} \\ -y_{21} & -y_{22} \end{bmatrix}, \quad r_y^* = \begin{bmatrix} \mp i_{ш y 1} \\ \pm i_{ш y 2} \end{bmatrix}. \quad (4.18)$$

Верхние знаки перед шумовыми токами и напряжениями относятся к скрещиванию левых выводов, нижние — правых. Сигнальные параметры в обоих случаях изменяют знак одинаково. Если одновременно скрещиваются выводы слева и справа (рис. 4.5в), то сигнальные параметры шумящего четырехполюсника (дважды скрещенного) не изменяют знаков; шумовые же токи и напряжения, сохраняя абсолютную величину, изменяют знаки.

Практика применения активных элементов, особенно транзисторов, подтвердила целесообразность варьирования способами подключения к четырехполюснику источника сигнала и нагрузки, а также комбинированием их при построении многоэлементных структур [13, 35, 74, 107].

## 4.2. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Шумовые схемы замещения транзисторов (и им подобные), приведенные на рис. 1.2 и 1.3, в дальнейшем будем называть физическими. Такие схемы замещения содержат источники шума, учитывающие природу порождающих их процессов. По ним можно рассчитать

результатирующие шумовые токи и напряжения, которые входят в системы параметров шумящего четырехполюсника [16, 80, 107].

Физические схемы замещения, раскрывая сущность флуктуационных процессов, позволяют целенаправленно бороться с первоисточниками шума, в частности, за счет улучшения конструкций и совершенствования технологии электронных приборов. Непосредственное использование физических схем замещения для расчета шумов электрических цепей затрудняется сложностью определения их составляющих и точных моделей элементов. Обычно для одного и того же прибора, например транзистора, предлагается множество физических схем замещения, основывающихся на различных моделях флуктуационных процессов. Все они формируются с определенными допущениями и ограничениями, включая диапазон частот, на который они рассчитаны. Сложность отыскания физических схем замещения чрезвычайно возрастает при переходе на интегральные структуры, содержащие большое число взаимосвязанных полупроводниковых элементов. На определенной стадии технологической интеграции поиски полных физических схем полиэлементных структур, по-видимому, окажутся просто несостоятельными.

Для анализа шумов активных четырехполюсников широкое применение находят канонические схемы замещения (рис. 4.6, 4.7).

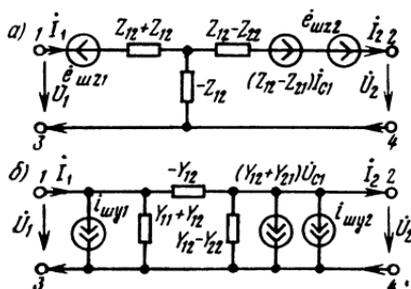


Рис. 4.7. Схемы замещения активного шумящего линейного четырехполюсника:

а) Т-образная, б) П-образная

На схемах замещения пассивного четырехполюсника (рис. 4.8) все флуктуации отнесены к образующим их составляющим и количество результирующих источников

шума равно числу последних. При Т-образной схеме замещения флуктуации учитываются источниками шумового напряжения (рис. 4.8б), в П-образной схеме — источниками шумового тока (рис. 4.8г). При этом предполагается, что все источники шума не коррелированы [26, 83].

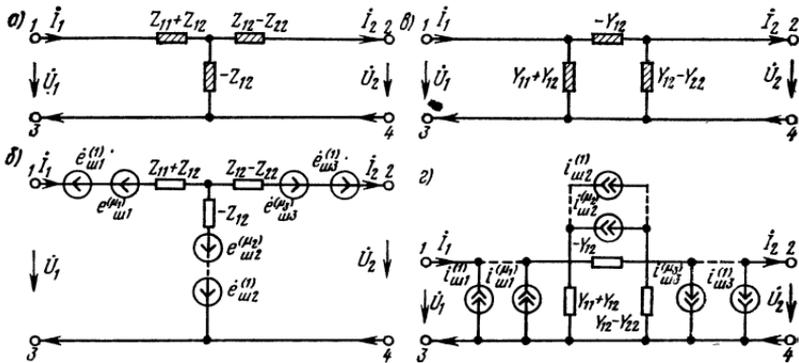


Рис. 4.8. Схемы замещения пассивного шумящего четырехполюсника:  
а), б) Т-образная, в), г) П-образная

Источники шума в четырехполюснике могут иметь любое происхождение и обычно по интенсивности превышают тепловые флуктуации, поэтому

$$R_{m1}^{(p)} > \operatorname{Re}(z_{11} + z_{12}), \quad R_{m2}^{(p)} > \operatorname{Re}(-z_{12}), \quad R_{m3}^{(p)} > \operatorname{Re}(z_{12} - z_{22}) \text{ или} \\ G_{m1}^{(p)} > \operatorname{Re}(y_{11} + y_{12}), \quad G_{m2}^{(p)} > \operatorname{Re}(-y_{12}), \quad G_{m3}^{(p)} > \operatorname{Re}(y_{12} - y_{22}).$$

Рассмотрим обобщенные схемы замещения (рис. 4.8), на которых количество источников шума в каждой ветви примем произвольным и равным целым числом  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ . Предполагая отсутствие корреляции между источниками шума, определим для схем:

Т-образной

$$e_{m1}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu_1} e_{m1}^{(s)}, \quad e_{m2}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu_2} e_{m2}^{(s)}, \quad e_{m3}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu_3} e_{m3}^{(s)}; \quad (4.19)$$

П-образной

$$i_{m1}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu_1} i_{m1}^{(s)}, \quad i_{m2}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu_2} i_{m2}^{(s)}, \quad i_{m3}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu_3} i_{m3}^{(s)}. \quad (4.20)$$

Используя (2.1), (2.2) и подставляя в них соответственно (4.19)—(4.20), получим эквивалентные шумовые сопротивления и проводимости для схем:

T-образной

$$R_{\text{ш1}}^{(p)} = (4kT \Delta f)^{-1} \sum_{s=1}^{\mu_1} \overline{|e_{\text{ш1}}^{(s)}|^2}, \quad (4.21)$$

$$R_{\text{ш2}}^{(p)} = (4kT \Delta f)^{-1} \sum_{s=1}^{\mu_2} \overline{|e_{\text{ш2}}^{(s)}|^2}, \quad (4.22)$$

$$R_{\text{ш3}}^{(p)} = (4kT \Delta f)^{-1} \sum_{s=1}^{\mu_3} \overline{|e_{\text{ш3}}^{(s)}|^2}; \quad (4.23)$$

П-образной

$$G_{\text{ш1}}^{(p)} = (4kT \Delta f)^{-1} \sum_{s=1}^{\mu_1} \overline{|i_{\text{ш1}}^{(s)}|^2}, \quad (4.24)$$

$$G_{\text{ш2}}^{(p)} = (4kT \Delta f)^{-1} \sum_{s=1}^{\mu_2} \overline{|i_{\text{ш2}}^{(s)}|^2}, \quad (4.25)$$

$$G_{\text{ш3}}^{(p)} = (4kT \Delta f)^{-1} \sum_{s=1}^{\mu_3} \overline{|i_{\text{ш3}}^{(s)}|^2}. \quad (4.26)$$

Для принятых направлений источников шума на основании схемы рис. 4.8б запишем

$$\dot{e}_{\text{шz1}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu_1} \dot{e}_{\text{ш1}}^{(s)} - \sum_{s=1}^{\mu_2} \dot{e}_{\text{ш2}}^{(s)}, \quad \dot{e}_{\text{шz2}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu_3} \dot{e}_{\text{ш3}}^{(s)} - \sum_{s=1}^{\mu_2} \dot{e}_{\text{ш2}}^{(s)} \quad (4.27)$$

и на основании схемы рис. 4.8г

$$i_{\text{шy1}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu_1} i_{\text{ш1}}^{(s)} - \sum_{s=1}^{\mu_2} i_{\text{ш2}}^{(s)}, \quad i_{\text{шy2}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu_3} i_{\text{ш3}}^{(s)} - \sum_{s=1}^{\mu_2} i_{\text{ш2}}^{(s)}. \quad (4.28)$$

Далее легко перейти и к другим системам параметров, воспользовавшись для этого соотношениями табл. 4.1.

Определение шумовых токов и напряжений четырехполюсника в режиме короткого замыкания и холостого хода в сочетании с методом эквивалентного источника шума позволяет найти эти величины для составных пассивных четырехполюсников, образованных, например, из шумящих двухполюсников [35, 83].

В табл. 4.2 приведены в матричной форме шумовые токи и напряжения наиболее часто встречающихся составных пассивных четырехполюсников, а сигнальные параметры — в табл. П.3—П.9. Аналогичным образом можно получить шумовые величины и сигнальные параметры практически любых составных пассивных четырехполюсников, образованных из известных шумящих двухполюсников.

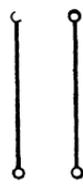
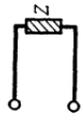
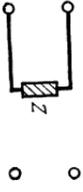
### 4.3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Между источниками шума в рассмотренных системах параметров шумящего четырехполюсника в общем случае существует корреляционная связь, которую необходимо учитывать при анализе и расчетах шумов электрических цепей [15, 25, 71, 83].

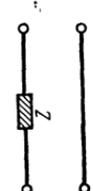
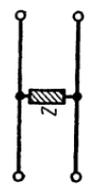
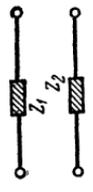
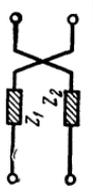
Все системы параметров одинаковы по потенциальным возможностям, но неравноценны в случае решения практических задач с элементами, которым присущи совершенно определенные свойства. Известно, что для расчета сигнальных показателей транзисторных цепей необходимо знать соответствующие параметры транзисторов. Их можно определить из физической схемы замещения транзистора или измерить (паспортные данные не всегда бывают достаточно полными). При производстве транзисторов и разработке аппаратуры, во многих других случаях, измерение параметров оказывается совершенно необходимым. Это обстоятельство и является решающим при выборе системы сигнальных параметров. Биполярные транзисторы имеют низкое входное сопротивление, поэтому легко достигается режим холостого хода, и высокое выходное — удобно для короткого замыкания; униполярным транзисторам свойственна двусторонняя низкая проводимость, поэтому легко осуществим режим короткого замыкания. Исходя из аналогичных соображений, выбираются системы сигнальных параметров и для других активных или пассивных элементов электрических цепей [35, 65, 88].

Соображения практического характера лежат и в основе выбора системы шумовых источников, которая не всегда совпадает с системой предпочтительных сигнальных параметров. Но в этом и нет особой необходимости — сигнальные параметры одной системы легко пересчитываются в другую по формулам табл. П.1. Несколькими иначе обстоит дело с определением шумовых

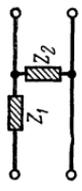
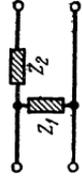
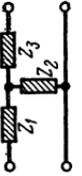
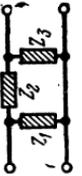
Таблица 4.2

Матрица	Реализация матрицы для схем			
				
$[r_a]$	—	—	—	—
$[r_b]$	—	—	—	—
$[r_n]$	—	—	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_m \\ 0 \end{bmatrix}$	—
$[r_f]$	—	—	—	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_m \\ 0 \end{bmatrix}$
$[r_z]$	—	—	—	—
$[r_y]$	—	—	$\begin{bmatrix} 1 \\ Z \dot{e}_m \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -Z \dot{e}_m \end{bmatrix}$

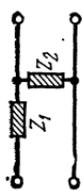
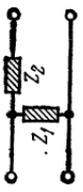
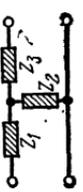
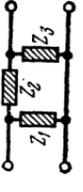
Реализация матрицы для схем

Матрица				
$[r_a]$	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_{III} \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{Z} \dot{e}_{III} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -(\dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2}) \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -(\dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2}) \\ 0 \end{bmatrix}$
$[r_b]$	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{III} \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{Z} \dot{e}_{III} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2} \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2} \\ 0 \end{bmatrix}$
$[r_c]$	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_{III} \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{Z} \dot{e}_{III} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -(\dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2}) \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -(\dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2}) \\ 0 \end{bmatrix}$
$[r_f]$	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{III} \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{Z} \dot{e}_{III} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2} \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -(\dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2}) \\ 0 \end{bmatrix}$
$[r_z]$	—	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_{III} \\ -\dot{e}_{III} \end{bmatrix}$	—	—
$[r_y]$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z} \dot{e}_{III} \\ \frac{1}{Z} \dot{e}_{III} \end{bmatrix}$	—	$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1 + Z_2} (\dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2}) \\ \frac{1}{Z_1 + Z_2} (\dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2}) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1 + Z_2} (\dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2}) \\ -\frac{1}{Z_1 + Z_2} (\dot{e}_{III1} + \dot{e}_{III2}) \end{bmatrix}$

Реализация матрицы для схем

Матрица				
[ra]	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_{ш1} + Z_1 Y_2 \dot{e}_{ш2} \\ Y_2 \dot{e}_{ш2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_{ш2} \\ Y_1 (\dot{e}_{ш1} - \dot{e}_{ш2}) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{ш1} + Z_1 [Y_2 \dot{e}_{ш2} - (Y_1 + Y_2) \dot{e}_{ш3}] \\ Y_2 (\dot{e}_{ш2} - \dot{e}_{ш3}) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_{ш2} + Z_2 Y_3 \dot{e}_{ш3} \\ Y_1 [\dot{e}_{ш1} - \dot{e}_{ш2} + Y_3 (Z_1 + Z_2) \dot{e}_{ш3}] \end{bmatrix}$
[rb]	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{ш1} \\ -Y_2 (\dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2}) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 Z_2 \dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2} \\ -Y_1 \dot{e}_{ш1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -Z_3 [(Y_2 + Y_3) \dot{e}_{ш1} - Y_2 \dot{e}_{ш3}] + \dot{e}_{ш3} \\ Y_2 (\dot{e}_{ш1} - \dot{e}_{ш2}) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 Z_2 \dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2} \\ -Y_3 [Y_1 (Z_2 + Z_3) \dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2} + \dot{e}_{ш3}] \end{bmatrix}$
[rc]	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_{ш1} \\ -Y_2 \dot{e}_{ш2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 \dot{e}_{ш1} + Y_2 \dot{e}_{ш2} \\ -\dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2} \\ -\dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2} \\ Z_1 + Z_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{ш1} - \frac{Y_2 \dot{e}_{ш2} + Y_3 \dot{e}_{ш3}}{Y_2 + Y_3} \\ -\dot{e}_{ш2} + \dot{e}_{ш3} \\ Z_2 + Z_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 \dot{e}_{ш1} + \frac{Y_2 \dot{e}_{ш2}}{Y_1 + Y_2} \\ -\dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2} \\ Z_1 + Z_2 \end{bmatrix}$
[rd]	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_{ш1} \\ -Y_2 \dot{e}_{ш2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{ш2} \\ Y_1 \dot{e}_{ш1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_2 \dot{e}_{ш2} - \frac{Y_3 \dot{e}_{ш3}}{Y_2 + Y_3} \\ -\dot{e}_{ш2} + \dot{e}_{ш3} \\ Z_2 + Z_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_2 \dot{e}_{ш2} - \frac{Y_3 \dot{e}_{ш3}}{Y_2 + Y_3} \\ -\dot{e}_{ш2} + \dot{e}_{ш3} \\ Z_2 + Z_3 \end{bmatrix}$
[re]	$\begin{bmatrix} Y_1 \dot{e}_{ш1} - \frac{Y_2 \dot{e}_{ш2}}{Y_1 + Y_2} \\ \dot{e}_{ш1} + \frac{\dot{e}_{ш2}}{Z_1 + Z_2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{ш2} \\ Y_1 \dot{e}_{ш1} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 \dot{e}_{ш1} + \frac{Y_2 \dot{e}_{ш2}}{Y_1 + Y_2} + \dot{e}_{ш3} \\ -\dot{e}_{ш1} + \frac{\dot{e}_{ш2}}{Z_1 + Z_2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_2 \dot{e}_{ш2} - \frac{Y_3 \dot{e}_{ш3}}{Y_2 + Y_3} \\ -\dot{e}_{ш2} + \frac{\dot{e}_{ш3}}{Z_2 + Z_3} \\ Y_1 \dot{e}_{ш1} + \frac{\dot{e}_{ш2} + \dot{e}_{ш3}}{Z_2 + Z_3} \end{bmatrix}$

Реализация матрицы для схем

			
$\begin{bmatrix} -(\dot{e}_{\Pi 1} + \dot{e}_{\Pi 2}) \\ -\dot{e}_{\Pi 2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\dot{e}_{\Pi 1} \\ -\dot{e}_{\Pi 1} + \dot{e}_{\Pi 2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \dot{e}_{\Pi 1} - \dot{e}_{\Pi 2} \\ -\dot{e}_{\Pi 2} \dot{\nrightarrow} \dot{e}_{\Pi 3} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{(Z_2 + Z_3) \dot{e}_{\Pi 1} + \dot{e}_{\Pi 2}}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ \dot{e}_{\Pi 2} + Z_3 \frac{\dot{e}_{\Pi 2} + \dot{e}_{\Pi 3}}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ Z_3 \frac{(-\dot{e}_{\Pi 1} + \dot{e}_{\Pi 2}) - \dot{e}_{\Pi 3}}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ \dot{e}_{\Pi 3} \dot{\nrightarrow} -(Z_1 + Z_3) \dot{e}_{\Pi 3} \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} Y_1 \dot{e}_{\Pi 1} \\ Y_1 \dot{e}_{\Pi 1} - Y_2 \dot{e}_{\Pi 2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 \dot{e}_{\Pi 1} + Y_2 \dot{e}_{\Pi 2} \\ Y_2 \dot{e}_{\Pi 2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{(Y_2 + Y_3) Y_1 \dot{e}_{\Pi 1} + \dot{e}_{\Pi 2}}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \\ \dot{e}_{\Pi 2} + Y_1 Y_2 \dot{e}_{\Pi 2} + Y_1 Y_3 \dot{e}_{\Pi 3} \\ -\frac{Y_1 Y_3 \dot{e}_{\Pi 1} - Y_2 Y_3 \dot{e}_{\Pi 2} + \dot{e}_{\Pi 3}}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \\ \dot{e}_{\Pi 3} \dot{\nrightarrow} + (Y_1 \dot{\nrightarrow} Y_3) Y_3 \dot{e}_{\Pi 3} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 \dot{e}_{\Pi 1} \dot{\nrightarrow} Y_2 \dot{e}_{\Pi 2} \\ Y_2 \dot{e}_{\Pi 2} - Y_3 \dot{e}_{\Pi 3} \end{bmatrix}$

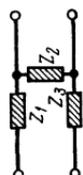
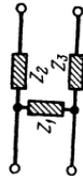
Реализация матрицы для схем

$[r_a] \left[ \begin{array}{l} -(\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m3}) + \\ + (Z_1 + Z_3) Y_2 \dot{e}_{m2} \\ Y_2 \dot{e}_{m2} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} -(\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3}) \\ Y_1 (\dot{e}_{m1} - \dot{e}_{m2} - \dot{e}_{m3}) \end{array} \right]$	$-(\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m4}) + \\ + Y_3 (Z_2 + Z_4) \dot{e}_{m3} \\ Y_1 [\dot{e}_{m1} - \dot{e}_{m2} - \dot{e}_{m4} + \\ + Y_3 (Z_1 + Z_2 + Z_4) \dot{e}_{m3}]$	$\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m4} + Y_2 [(Z_1 + Z_4) \times \\ \times \dot{e}_{m2} - (Z_1 + Z_2 + Z_4) \times \\ \times (\dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m5})] \\ Y_2 (\dot{e}_{m2} - \dot{e}_{m3} - \dot{e}_{m5})$
$[r_b] \left[ \begin{array}{l} \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m3} \\ -Y_2 (\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3}) \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} Y_1 (Z_2 + Z_3) \dot{e}_{m1} + \\ + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3} \\ -Y_1 \dot{e}_{m1} \end{array} \right]$	$Y_1 (Z_2 + Z_4) \dot{e}_{m1} + \\ + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m4} \\ -Y_3 [Y_1 (Z_2 + Z_3 + Z_4) \times \\ \times \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m3} + \\ + \dot{e}_{m4}]$	$-Y_2 [(Z_2 + Z_3 + Z_5) \times \\ \times (\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m4}) - \\ - (Z_3 + Z_5) \dot{e}_{m2}] + \\ + \dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m5} \\ Y_2 (\dot{e}_{m1} - \dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m5})$
$[r_h] \left[ \begin{array}{l} -(\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) \\ -Y_2 \dot{e}_{m2} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} -\frac{(Z_2 + Z_3) \dot{e}_{m1} + \rightarrow}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ \rightarrow + \frac{Z_1 (\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3})}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ -\frac{\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3}}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} -\frac{(Z_3 + Z_4) \dot{e}_{m1} + \rightarrow}{Z_1 + Z_2 + Z_4} \\ \rightarrow + \frac{Z_1 (\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m4})}{Z_1 + Z_2 + Z_4} \\ -\frac{\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m4}}{Z_1 + Z_2 + Z_4} \\ - Y_3 \dot{e}_{m3} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m4} - \frac{(Z_3 + Z_5) \times}{Z_3} \rightarrow \\ \rightarrow \times \frac{\dot{e}_{m2} + Z_3 (\dot{e}_{m3} + \rightarrow}{\rightarrow + Z_3 + Z_5} \\ \rightarrow + \dot{e}_{m5}) \\ -\frac{\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m5}}{Z_2 + Z_3 + Z_5} \end{array} \right]$

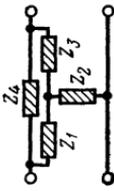
Реализация матрицы для схем

$[r_1] \left[ \begin{array}{l} -\frac{Z_2(\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m3})}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \rightarrow \\ \rightarrow -\frac{(Z_1 + Z_3)\dot{e}_{m2}}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3} \\ \frac{\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3}}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3} \\ Y_1 \dot{e}_{m1} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} -\frac{Z_3(\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m4})}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \rightarrow \\ \rightarrow -\frac{(Z_2 + Z_4)\dot{e}_{m3}}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \\ Y_1 \dot{e}_{m1} + \\ \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m4} \\ + \frac{\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m4}}{Z_2 + Z_3 + Z_4} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} -\frac{Z_2(\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m4})}{Z_1 + Z_2 + Z_4} \rightarrow \\ \rightarrow + \frac{(Z_1 + Z_4)\dot{e}_{m2}}{Z_1 + Z_2 + Z_4} + \\ + \dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m5} \\ -\frac{\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m3} - \dot{e}_{m4}}{Z_1 + Z_2 + Z_4} \end{array} \right]$
$[r_2] \left[ \begin{array}{l} -(\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3}) \\ -\dot{e}_{m2} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} -\dot{e}_{m1} \\ -\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} -\frac{(Z_2 + Z_3 + Z_4)\dot{e}_{m1}}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} \rightarrow \\ \rightarrow + \frac{Z_1(\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m4})}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} \\ Z_3(-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m4}) \rightarrow \\ \frac{Z_3(-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m4})}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} \rightarrow \\ \rightarrow -\frac{(Z_1 + Z_3)\dot{e}_{m3}}{(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m4} - \dot{e}_{m2} \\ -\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m5} \end{array} \right]$

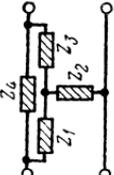
Реализация матрицы для схем

Матрица				
$[r_y]$	$\begin{bmatrix} \frac{e_{\text{ш1}} + e_{\text{ш3}}}{Z_1 + Z_3} \\ \frac{e_{\text{ш1}} + e_{\text{ш3}}}{Z_1 + Z_3} - Y_2 e_{\text{ш2}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 e_{\text{ш1}} + \frac{e_{\text{ш2}} + e_{\text{ш3}}}{Z_2 + Z_3} \\ \frac{e_{\text{ш2}} + e_{\text{ш3}}}{Z_2 + Z_3} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 e_{\text{ш1}} + \frac{e_{\text{ш2}} + e_{\text{ш4}}}{Z_2 + Z_4} \\ \frac{e_{\text{ш2}} + e_{\text{ш4}}}{Z_2 + Z_4} - Y_3 e_{\text{ш3}} \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} & \frac{-(Z_2 + Z_3 + Z_6) \times \rightarrow}{Z_2 (Z_1 + Z_3) + \rightarrow} \\ & \rightarrow \times (e_{\text{ш1}} + e_{\text{ш4}}) + \rightarrow \\ & \rightarrow + Z_4 + Z_6) + \rightarrow \\ & \rightarrow + (Z_3 + Z_6) \times \rightarrow \\ & \rightarrow \times (Z_1 + Z_4) \times \rightarrow \\ & \rightarrow \times e_{\text{ш2}} + Z_2 \times \rightarrow \\ & \rightarrow \times (Z_3 + Z_6) \\ & \rightarrow \times (e_{\text{ш3}} + e_{\text{ш5}}) \\ & \rightarrow \frac{-Z_3(e_{\text{ш1}} + e_{\text{ш4}}) \rightarrow}{Z_3(Z_1 + Z_3 + Z_4) + \rightarrow} \\ & \rightarrow \frac{-(Z_1 + Z_4) \times \rightarrow}{+ Z_5) + (Z_1 + Z_4) \times \rightarrow} \\ & \rightarrow \times e_{\text{ш2}} + (Z_1 + \rightarrow \\ & \rightarrow \times (Z_3 + Z_6) \\ & \rightarrow + Z_2 + Z_4) \times \rightarrow \\ & \rightarrow \times (e_{\text{ш3}} + e_{\text{ш5}}) \end{aligned}$

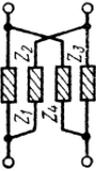
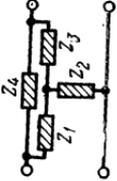
Реализация матрицы для схем

Матрица		
[a]	$\left[ \begin{array}{l} \frac{(Y_2 + Y_3)(Y_1 \dot{e}_{\text{ш1}} - Y_4 \dot{e}_{\text{ш4}}) + (Y_1 + Y_4)(Y_2 \dot{e}_{\text{ш2}} - Y_3 \dot{e}_{\text{ш3}})}{Y_2 Y_4 - Y_1 Y_3} \\ - \frac{(Z_3 + Z_4)(\dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{ш2}}) + (Z_1 + Z_2)(\dot{e}_{\text{ш3}} + \dot{e}_{\text{ш4}})}{Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} \frac{Y_3(Y_1 \dot{e}_{\text{ш1}} + Y_2 \dot{e}_{\text{ш2}}) - (Y_1 + Y_2)Y_3 \dot{e}_{\text{ш3}} - (Y_1 + Y_3) + \rightarrow}{Y_1 Y_3 + Y_4(Y_1 + Y_2 + Y_3)} \\ \rightarrow + Y_3 \frac{Y_4 \dot{e}_{\text{ш4}}}{Z_1 Z_3 + Z_3(Z_1 + Z_3 + Z_4)} \\ - \frac{Z_3(\dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{ш4}}) + (Z_1 + Z_3 + Z_4)\dot{e}_{\text{ш2}} - (Z_1 + Z_4)\dot{e}_{\text{ш3}}}{Z_1 Z_3 + Z_3(Z_1 + Z_3 + Z_4)} \end{array} \right]$
[b]	$\left[ \begin{array}{l} - \frac{(Z_3 + Z_4)(-Z_2 \dot{e}_{\text{ш1}} + Z_1 \dot{e}_{\text{ш2}}) + (Z_1 + Z_2) \times \rightarrow}{Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3} \\ \rightarrow \times \frac{(Z_4 \dot{e}_{\text{ш3}} + Z_3 \dot{e}_{\text{ш4}})}{Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3} \\ - \frac{(Z_3 + Z_4)(\dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{ш4}}) - (Z_1 + Z_4)(\dot{e}_{\text{ш2}} + \dot{e}_{\text{ш3}})}{Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} - \frac{(Z_2 + Z_3)Z_4 \dot{e}_{\text{ш1}} + Z_2 Z_3 Z_4 (Y_2 \dot{e}_{\text{ш2}} + Y_3 \dot{e}_{\text{ш3}}) + \rightarrow}{Z_1 Z_3 + Z_3(Z_1 + Z_3 + Z_4)} \\ \rightarrow + (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3) \dot{e}_{\text{ш4}} \\ \frac{(Z_3 + Z_4)\dot{e}_{\text{ш1}} - (Z_1 + Z_3 + Z_4)\dot{e}_{\text{ш2}} + Z_1(\dot{e}_{\text{ш3}} - \dot{e}_{\text{ш4}})}{Z_1 Z_3 + Z_3(Z_1 + Z_3 + Z_4)} \end{array} \right]$

Реализация матрицы для схем

Матрица		$\left[ \begin{array}{l} -\frac{Y_1 \dot{e}_{m1} + Y_3 \dot{e}_{m3}}{Y_1 + Y_3} + \frac{Y_3 \dot{e}_{m3} - Y_4 \dot{e}_{m4}}{Y_3 + Y_4} \\ \frac{\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}}{Z_1 + Z_2} - \frac{\dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m4}}{Z_3 + Z_4} \end{array} \right]$
	$\left[ \begin{array}{l} \frac{(Y_2 + Y_3) Y_1 \dot{e}_{m1} - Y_1 (Y_2 \dot{e}_{m2} + Y_3 \dot{e}_{m3}) - \rightarrow}{Y_1 (Y_2 + Y_3) + Y_4 (Y_1 + Y_2 + Y_3)} \\ \rightarrow - (Y_1 + Y_2 + Y_3) Y_4 \dot{e}_{m4} \\ Z_3 (\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m4}) - (Z_1 + Z_3 + Z_4) \dot{e}_{m2} + (Z_1 + Z_4) \dot{e}_{m3} \\ Z_3 (Z_1 + Z_4) + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4) \end{array} \right]$	
[r_l]	$\left[ \begin{array}{l} \frac{Y_1 \dot{e}_{m1} - Y_4 \dot{e}_{m4}}{Y_1 + Y_4} + \frac{Y_2 \dot{e}_{m2} - Y_3 \dot{e}_{m3}}{Y_2 + Y_3} \\ \frac{\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m4}}{Z_1 + Z_4} - \frac{\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3}}{Z_2 + Z_3} \end{array} \right]$	$\left[ \begin{array}{l} -\frac{Y_3 (Y_1 \dot{e}_{m1} + Y_2 \dot{e}_{m2}) + (Y_1 + Y_2) Y_3 \dot{e}_{m3} + \rightarrow}{Y_3 (Y_1 + Y_2) + Y_4 (Y_1 + Y_2 + Y_3)} \\ \rightarrow + (Y_1 + Y_2 + Y_3) Y_4 \dot{e}_{m4} \\ -\frac{(Z_3 + Z_4) \dot{e}_{m1} - (Z_1 + Z_3 + Z_4) \dot{e}_{m2} + Z_1 \times \rightarrow}{Z_1 (Z_3 + Z_4) + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4)} \\ \rightarrow \times (\dot{e}_{m3} - \dot{e}_{m4}) \end{array} \right]$

Реализация матрицы для схем

Матрица		
[r <sub>2</sub> ]	$\begin{bmatrix} -\frac{(Z_2 + Z_3)(\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m4}) + (Z_1 + Z_4)(\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m3})}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} \\ (Z_3 + Z_4)(\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) - (Z_1 + Z_2)(\dot{e}_{m3} + \dot{e}_{m4}) \\ Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{(Z_3 + Z_4)\dot{e}_{m1} + Z_1(\dot{e}_{m3} - \dot{e}_{m4})}{Z_1 + Z_3 + Z_4} - \dot{e}_{m2} \\ \frac{Z_3(\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m4}) + (Z_1 + Z_4)\dot{e}_{m3}}{Z_1 + Z_3 + Z_4} - \dot{e}_{m2} \end{bmatrix}$
[r <sub>1</sub> ]	$\begin{bmatrix} \frac{(Y_3 + Y_4)(Y_1\dot{e}_{m1} - Y_2\dot{e}_{m2}) + (Y_1 + Y_2) \times \rightarrow}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4} \\ \rightarrow \times (Y_4\dot{e}_{m4} - Y_3\dot{e}_{m3}) \\ \frac{(Y_2 + Y_3)(Y_1\dot{e}_{m1} - Y_4\dot{e}_{m4}) + (Y_1 + Y_4) \times \rightarrow}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4} \\ \rightarrow \times (Y_3\dot{e}_{m2} - Y_3\dot{e}_{m3}) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{(Y_2 + Y_3)Y_1\dot{e}_{m1} + Y_1(Y_1\dot{e}_{m2} + Y_3\dot{e}_{m3})}{Y_1 + Y_2 + Y_3} + Y_4\dot{e}_{m4} \\ -\frac{Y_3(Y_1\dot{e}_{m1} + Y_2\dot{e}_{m2}) + (Y_1 + Y_2)Y_3\dot{e}_{m3}}{Y_1 + Y_2 + Y_3} + Y_4\dot{e}_{m4} \end{bmatrix}$

токов и напряжений, например измерить величины  $e_{шb}$  и  $i_{шb}$  низкошумящих транзисторов чрезвычайно трудно. Практически неразрешимые затруднения имеются и при измерении коэффициента корреляции между шумовыми токами и напряжениями. При выборе системы источников шума эти обстоятельства нельзя не принимать во внимание, но они не являются единственными, хотя и имеют решающее значение.

Двустороннее расположение источников шума при определении влияния внутренних флуктуаций на отношение сигнал/шум требует приведения их к одной из сторон четырехполюсника. Поэтому для расчетов оно менее удобно, чем одностороннее.

С одной стороны четырехполюсника источники шума располагаются в системах  $a$ - и  $b$ -параметров. В первой из них источники шума включены слева — на входе (при передаче сигнала слева направо) во второй, для того же направления передачи — на выходе четырехполюсника.

Для анализа шумовых свойств наиболее подходит система  $a$ -параметров. Использование ее не нарушает уже сложившихся тенденций в оценке флуктуаций электрических цепей посредством отнесенных ко входу показателей шума — эквивалентных источников, сопротивлений шума и т. д. Эта система источников шума упрощает анализ ступенчатого соединения четырехполюсников, в частности, усилительных устройств и при косвенных измерениях шумовых показателей с применением калиброванных генераторов шума [34, 42, 87].

Шумовые и сигнальные свойства четырехполюсника в системе  $a$ -параметров, как было установлено выше, описываются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= a_{11} \dot{U}_2 + a_{12} \dot{I}_2 + \dot{e}_{ш a}, \\ \dot{I}_1 &= a_{21} \dot{U}_2 + a_{22} \dot{I}_2 + \dot{i}_{ш a}, \end{aligned} \right\}$$

где  $a_{11}$  — обратный коэффициент передачи по напряжению;  $a_{12}$  — прямое переходное сопротивление;  $a_{21}$  — обратная переходная проводимость и  $a_{22}$  — обратный коэффициент передачи по току;  $\dot{e}_{ш a}$  и  $\dot{i}_{ш a}$  — эквивалентные источники шумового напряжения и тока.

Преобразуем шумящий четырехполюсник (рис. 4.1) следующим образом: в соответствии с известным правилом разбиения сложной цепи на отдельные составляющие, представим его в виде двух каскадно вклю-

ченных четырехполюсников (рис. 4.9а). Первый из них с выводами 1, 3—1', 3' содержит только источники шума  $\dot{e}_{шa}$  и  $i_{шa}$  (рис. 4.9б), которые на сигнальные показатели никакого влияния не оказывают: источник на-

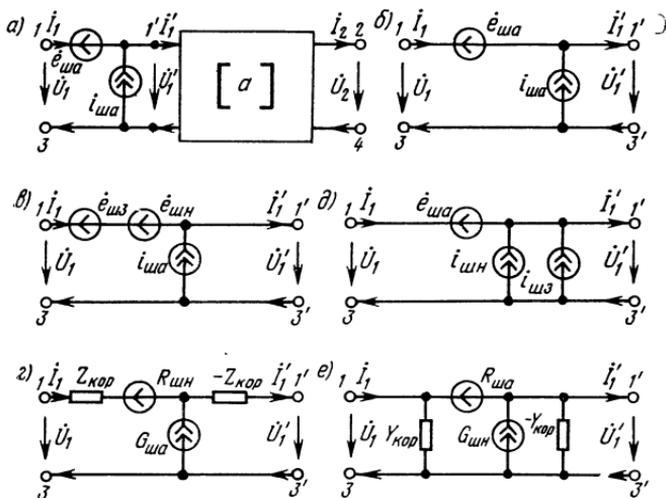


Рис. 4.9. Шумящий линейный четырехполюсник:  
 а) с вынесенными ко входу источниками шума,  
 б) отдельно взятый шумовой четырехполюсник,  
 в) при разделенном источнике шумового напряжения,  
 г) при разделенном источнике шумового тока,  
 д) с корреляционным сопротивлением шума,  
 е) с корреляционной проводимостью шума

пряжения  $\dot{e}_{шa}$ , включенный последовательно, имеет нулевое внутреннее сопротивление; источник тока  $i_{шa}$ , включенный параллельно, имеет нулевую внутреннюю проводимость. Второй четырехполюсник с выводами 1', 3'—2, 4 (рис. 4.9а) полностью определяет сигнальные свойства и совершенно не содержит внутренних источников флуктуаций. Исходя из этого, первый четырехполюсник называют шумовым, а второй — сигнальным. Несмотря на очевидную условность представления шумящего четырехполюсника в виде двух функционально обособленных составляющих, оно оказывается исключительно плодотворным при анализе его шумовых и сигнальных свойств [25, 83, 97, 123].

Используя зависимости между сигнальными величинами, приведенные в табл. П.1, можно  $a$ -параметры выразить в любой системе. Поэтому принятая система

шумовых источников между выводами слева ни в коей мере не ограничивает возможностей использования любой другой системы сигнальных параметров ( $h$  и  $y$  для транзисторов,  $f$  для операционных усилителей и т. д.)

#### 4.4. ПЕРВИЧНЫЕ ШУМОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Источники шума  $\dot{e}_{ша}$  и  $i_{ша}$ , образующие шумовой четырехполюсник, в общем случае статистически связаны. Это означает, что вероятность появления какого-либо значения шумового тока  $i_{ша}$  в заданный момент времени зависит от величины напряжения шума  $\dot{e}_{ша}$  в тот же или предшествующие моменты времени. Статистическая взаимосвязь между источниками шума определяется коэффициентом корреляции

$$\gamma_a = \frac{\overline{i_{ша} e_{ша}^*}}{(\overline{|i_{ша}|^2} \overline{|e_{ша}|^2})^{1/2}}, \quad (4.29)$$

где  $\overline{i_{ша} e_{ша}^*}$  — усредненное произведение шумового тока и сопряженного напряжения шума;  $\overline{|i_{ша}|^2}$  и  $\overline{|e_{ша}|^2}$  — средние квадраты тех же величин [25, 83, 123].

Для выяснения основных зависимостей между  $i_{ша}$  и  $\dot{e}_{ша}$  найдем результирующее напряжение шума между разомкнутыми выводами  $1'$ ,  $3'$ , мысленно подключив ко входу шумового четырехполюсника сопротивление  $Z_1 = -R_1 + iX_1$ , равное внутреннему сопротивлению источника сигнала. Флуктуации последнего, предположим, порождаются тепловыми процессами и учитываются источником шумового напряжения  $\dot{e}_{ш1}$ . Результирующее шумовое напряжение между выводами  $1'$ ,  $3'$  тогда определится выражением

$$\dot{e}_{ш}^{(p)} = \dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ша} + i_{ша} Z_1 \quad (4.30)$$

и соответственно средний квадрат его

$$\begin{aligned} \overline{|e_{ш}^{(p)}|^2} &= \overline{|e_{ш1} + e_{ша} + i_{ша} Z_1|^2} = \overline{|e_{ш1}|^2} + \overline{|e_{ша}|^2} + \\ &+ \overline{e_{ш1} i_{ша}^* Z_1^*} + \overline{e_{ш1}^* i_{ша} Z_1} + \overline{|i_{ша}|^2} |Z_1|^2. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Источник шума  $\dot{e}_{ш1}$  не коррелирован с  $\dot{e}_{ша}$  и  $i_{ша}$ , поэтому  $\overline{e_{ш1} e_{ша}^*} = \overline{e_{ш1} i_{ша}^* Z_1^*} = \overline{e_{ш1}^* e_{ша}} = \overline{e_{ш1}^* i_{ша} Z_1} = 0$ . Представим третье и четвертое слагаемые (4.31) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \overline{e_{ш a} i_{ш a}^*} Z_1^* &= \gamma_a^* \left( \frac{\overline{|e_{ш a}|^2}}{\overline{|i_{ш a}|^2}} \right)^{1/2} \overline{|i_{ш a}|^2} Z_1^* \text{ и } \overline{e_{ш a}^* i_{ш a}} Z_1 = \\ &= \gamma_a \left( \frac{\overline{|e_{ш a}|^2}}{\overline{|i_{ш a}|^2}} \right)^{1/2} \overline{|i_{ш a}|^2} Z_1, \end{aligned} \quad (4.32)$$

где  $\gamma_a^*$  — сопряженный коэффициент корреляции между источниками шума  $e_{ш a}$  и  $i_{ш a}$ .

Подставляя (4.32) в (4.31), после промежуточных преобразований и выкладок получим

$$\begin{aligned} \overline{|e_{ш}^{(p)}|^2} &= \overline{|e_{ш 1}|^2} + \overline{|e_{ш a}|^2} - \overline{|e_{ш a}|^2} |\gamma_a|^2 + \overline{|i_{ш a}|^2} \times \\ &\times \left| Z_1 + \gamma_a \left( \frac{\overline{|e_{ш a}|^2}}{\overline{|i_{ш a}|^2}} \right)^{1/2} \right|^2. \end{aligned} \quad (4.33)$$

В этом выражении особый интерес представляет член  $\gamma_a^* \left( \frac{\overline{|e_{ш a}|^2}}{\overline{|i_{ш a}|^2}} \right)^{1/2}$ , имеющий размерность сопротивления, величина которого определяется степенью статистической взаимосвязи источников  $e_{ш a}$  и  $i_{ш a}$ . Поэтому оно получило название корреляционного сопротивления шума

$$Z_{кор} = \gamma_a^* \left( \frac{\overline{|e_{ш a}|^2}}{\overline{|i_{ш a}|^2}} \right)^{1/2} = \frac{\overline{e_{ш a} i_{ш a}^*}}{\overline{|i_{ш a}|^2}}. \quad (4.34)$$

Учитывая (4.34), представим третий член (4.31) в таком виде  $\overline{|e_{ш a}|^2} |\gamma_a|^2 = \overline{|i_{ш a}|^2} |Z_{кор}|^2$ , и запишем

$$\overline{|e_{ш}^{(p)}|^2} = \overline{|e_{ш 1}|^2} + \overline{|e_{ш a}|^2} - \overline{|i_{ш a}|^2} |Z_{кор}|^2 + \overline{|i_{ш a}|^2} |Z_1 + Z_{кор}|^2. \quad (4.35)$$

Разность между вторым и третьим членами представляет собой независимую от  $i_{ш a}$  часть шумового напряжения  $e_{ш a} - i_{ш a} Z_{кор} = e_{ш \bar{a}}$  (рис. 4.9 в), поэтому

$$\overline{|e_{ш}^{(p)}|^2} = \overline{|e_{ш 1}|^2} + \overline{|e_{ш \bar{a}}|^2} + \overline{|i_{ш a}|^2} |Z_1 + Z_{кор}|^2 \quad (4.36)$$

или

$$\overline{|e_{ш}^{(p)}|^2} = \overline{|e_{ш 1}|^2} + \overline{|e_{ш \bar{a}}|^2}, \quad (4.37)$$

где  $\overline{|e_{ш \bar{a}}|^2}$  — средний квадрат эквивалентного шумового напряжения четырехполюсника

$$\overline{|e_{ш \bar{a}}|^2} = \overline{|e_{ш \bar{a}}|^2} + \overline{|i_{ш a}|^2} |Z_1 + Z_{кор}|^2, \quad (4.38)$$

зависимый от сопротивления источника сигнала, что не-

обходимо иметь в виду, если элемент по шумам характеризуется одним эквивалентным источником или сопротивлением (проводимостью) шума.

Коэффициент корреляции в общем случае является комплексной величиной и по абсолютному значению может принимать любые значения в пределах  $0 \leq \leq |\gamma_a| \leq 1$ , в зависимости от степени когерентности источников флуктуаций. Он обращается в нуль при некоррелированных  $e_{ша}$ ,  $i_{ша}$  и равен единице, если эти источники полностью статистически связаны, когда между ними существует простая функциональная зависимость [53].

Воспользовавшись методом эквивалентного шумового источника, составляющие (4.36) представим удовлетворяющими условиям:

$$\overline{|e_{ш}^{(p)}|^2} = 4kT_0 \Delta f R_{ш}^{(p)}; \quad (4.39)$$

$$\overline{|e_{ш1}|^2} = 4kT_0 \Delta f R_{ш1}, \quad (4.40)$$

$$\overline{|e_{шн}|^2} = 4kT_0 \Delta f R_{шн}, \quad (4.41)$$

$$\overline{|i_{ша}|^2} = 4kT_0 \Delta f G_{ша}. \quad (4.42)$$

Из (4.41) и (4.42) определим еще две величины:

— эквивалентное независимое шумовое сопротивление

$$R_{шн} = \frac{\overline{|e_{шн}|^2}}{4kT_0 \Delta f}; \quad (4.43)$$

— эквивалентную шумовую проводимость

$$G_{ша} = \frac{\overline{|i_{ша}|^2}}{4kT_0 \Delta f}. \quad (4.44)$$

Подставив их в (4.36), получим результирующее шумовое сопротивление

$$R_{ш}^{(p)} = R_{ш1} + R_{шн} + G_{ша} |Z_1 + Z_{кор}|^2 \quad (4.45)$$

и эквивалентное шумовое сопротивление четырехполюсника

$$R_{шэ} = R_{шн} + G_{ша} |Z_1 + Z_{кор}|^2, \quad (4.46)$$

которые более удобны в практическом отношении, чем средние квадраты результирующего и эквивалентного шумового напряжения. Из (4.45) следует, что шумовые свойства четырехполюсника с коррелированными источниками флуктуаций полностью описываются тремя величинами:  $R_{шн}$ ,  $G_{ша}$  и  $Z_{кор}$ , которые по соображениям

терминологической общности назовем *первичными шумовыми параметрами* четырехполюсника [74, 83].

На рис. 4.9г изображена каноническая схема замещения шумового четырехполюсника, отображающая взаимосвязь первичных шумовых параметров. Корреляционное сопротивление шума с отрицательным знаком, включенное на выходе четырехполюсника, компенсирует влияние на сигнал корреляционного сопротивления на входе. Корреляционное сопротивление шума является идеально бесшумным и играет скорее роль коэффициента пропорциональности, чем сопротивления в обычном его понимании. Если статистически независимую составляющую выделить из источника шумового тока  $i_{шн} = i_{ша} - i_{шэ}$ , как показано на рис. 4.9д, то после ряда промежуточных выкладок и преобразований можно получить вторую систему из трех первичных шумовых параметров (равноценную первой), в которую войдут:

— эквивалентная независимая шумовая проводимость

$$G_{шн} = \frac{\overline{|i_{шн}|^2}}{4kT_0 \Delta f}; \quad (4.47)$$

— эквивалентное шумовое сопротивление

$$R_{ша} = \frac{\overline{|e_{ша}|^2}}{4kT_0 \Delta f}; \quad (4.48)$$

— корреляционная проводимость шума

$$Y_{кор} = \gamma_a \left( \frac{\overline{|i_{ша}|^2}}{\overline{|e_{ша}|^2}} \right)^{1/2} = \frac{\overline{e_{ша}^* i_{ша}}}{\overline{|e_{ша}|^2}}. \quad (4.49)$$

В этом случае результирующий шумовой ток равен

$$\overline{|i_{ш}^{(p)}|^2} = \overline{|i_{ш1}|^2} + \overline{|i_{шн}|^2} + \overline{|e_{ша}|^2} |Y_1 + Y_{кор}|^2, \quad (4.50)$$

результирующая проводимость шума, определяемая из соотношения

$$\overline{|i_{ш}^{(p)}|^2} = 4kT_0 \Delta f G_{ш}^{(p)},$$

$$G_{ш}^{(p)} = G_{ш1} + G_{шн} + R_{ша} |Y_1 + Y_{кор}|^2 \quad (4.51)$$

и соответственно эквивалентные шумовой ток и проводимость шума четырехполюсника:

$$\overline{|i_{шэ}|^2} = \overline{|i_{шн}|^2} + \overline{|e_{ша}|^2} |Y_1 + Y_{кор}|^2, \quad (4.52)$$

$$G_{шэ} = G_{шн} + R_{ша} |Y_1 + Y_{кор}|^2. \quad (4.53)$$

Схема замещения шумового четырехполюсника, полученная для второй системы первичных шумовых параметров, представлена на рис. 4.9е. Корреляционная проводимость шума со знаком минус здесь также служит для компенсации влияния на передачу сигнала  $Y_{\text{кор}}$ .

Системы первичных шумовых параметров четырехполюсника взаимосвязаны:

$$R_{\text{шн}} = \frac{G_{\text{шн}}}{|Y_{\text{кор}}|^2 + \frac{G_{\text{шн}}}{R_{\text{ш а}}}}, \quad G_{\text{шн}} = \frac{R_{\text{шн}}}{|Z_{\text{кор}}|^2 + \frac{R_{\text{шн}}}{G_{\text{ш а}}}}; \quad (4.54)$$

$$G_{\text{ш а}} = G_{\text{шн}} + |Y_{\text{кор}}|^2 R_{\text{ш а}}, \quad R_{\text{ш а}} = R_{\text{шн}} + |Z_{\text{кор}}|^2 G_{\text{ш а}}; \quad (4.55)$$

$$Z_{\text{кор}} = \frac{Y_{\text{кор}}^*}{|Y_{\text{кор}}|^2 + \frac{G_{\text{шн}}}{R_{\text{ш а}}}}, \quad Y_{\text{кор}} = \frac{Z_{\text{кор}}^*}{|Z_{\text{кор}}|^2 + \frac{R_{\text{шн}}}{G_{\text{ш а}}}}. \quad (4.56)$$

В зависимости от способа включения изменяются передающие свойства и шумовые показатели четырехполюсника. Для расчета их используются обобщенные выражения, приведенные в табл. 4.3, полученные на основе неопределенной матрицы [63, 118].

Первичные шумовые параметры активных четырехполюсников могут быть измерены или определены расчетным путем [65, 83, 97, 107]. Измерение шумовых параметров пассивных четырехполюсников затрудняется отсутствием у них усиления и невысокой интенсивностью флуктуаций преимущественно теплового характера. Исключения составляют полупроводниковые аналоги пассивных элементов, имеющие более высокие шумы, но и у них возможность измерения первичных шумовых параметров не очевидна. Поэтому определение их расчетным путем приобретает особое значение.

Используя полученные выше соотношения общего вида, найдем формулы первичных шумовых параметров пассивных четырехполюсников и, в частности, составных — образуемых из отдельных двухполюсников. Если шумящий четырехполюсник представлен Т-образной схемой замещения (рис. 4.10а, б, в) и соответственно охарактеризован системой z-параметров:  $z_{11} = r_{11} + ix_{11}$ ,  $z_{12} = r_{12} + ix_{12}$  и  $z_{22} = r_{22} + ix_{22}$ , — то средние квадраты шумовых напряжений согласно выражениям  $\overline{|e_{\text{ш11}}|^2} = 4k T \Delta f r_{\text{ш11}}$ ,  $\overline{|e_{\text{ш12}}|^2} = 4k T \Delta f r_{\text{ш12}}$  и  $\overline{|e_{\text{ш22}}|^2} = 4k T \Delta f r_{\text{ш22}}$ .

86 Таблица 4.3

Включение четырехполюсника		Формулы преобразования параметров	
		сигнальные	шумовые
1		$y_{11}^{(ав)}$ $y_{12}^{(ав)}$ $y_{21}^{(ав)}$ $y_{22}^{(ав)}$	$G_{шн}$ $R_{шнa}$ $Y_{кор}$
2		$y_{11}^{(ав)} = y_{11}$ $y_{12}^{(ав)} = -(y_{11} + y_{12})$ $y_{21}^{(ав)} = -(y_{11} + y_{21})$ $y_{22}^{(ав)} = y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22}$	$G_{шн}^{(ав)} = \frac{G_{шн} R_{шнa}   y_{21}  ^2}{R_{шнa}   y_{11} + y_{21} - Y_{кор}  ^2 + G_{шн}}$ $R_{шнa}^{(ав)} = \frac{R_{шнa}   y_{11} + y_{21} - Y_{кор}  ^2 + G_{шн}}{  y_{11} + y_{21}  ^2}$ $Y_{кор}^{(ав)} = \frac{y_{21} [R_{шнa} Y_{кор} (y_{11} + y_{21} - Y_{кор}^*) - G_{шн}]}{R_{шнa}   y_{11} + y_{21} - Y_{кор}  ^2 + G_{шн}}$
3		$y_{11}^{(6в)} = y_{22}$ $y_{12}^{(6в)} = -(y_{21} + y_{22})$ $y_{21}^{(6в)} = -(y_{12} + y_{22})$ $y_{22}^{(6в)} = y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22}$	$G_{шн}^{(6в)} = \frac{G_{шн} R_{шнa}   y_{21}  ^2}{R_{шнa}   y_{11} + y_{21} - Y_{кор}  ^2 + G_{шн}}$ $R_{шнa}^{(6в)} = \frac{R_{шнa}   y_{11} + y_{21} - Y_{кор}  ^2 + G_{шн}}{  y_{21} + y_{22}  ^2}$ $Y_{кор}^{(6в)} = \frac{R_{шнa} (y_{11} y_{22} - y_{12} y_{21} - y_{22} Y_{кор}) (y_{11} + y_{21} - Y_{кор}) + G_{шн}}{R_{шнa}   y_{11} + y_{21} - Y_{кор}  ^2 + G_{шн}}$ $\rightarrow -Y_{кор}^* + G_{шн} y_{22}$

Включение четырехполюсника		Формулы преобразования параметров	
		сигнальные	шумовые
4		$y_{11}^{(6a)} = y_{22}$ $y_{12}^{(6a)} = y_{21}$ $y_{21}^{(6a)} = y_{12}$ $y_{22}^{(6a)} = y_{11}$	$G_{шн}^{(6a)} = \frac{G_{шн} R_{шнa}  y_{21} ^2}{R_{шнa}  y_{11} - Y_{кор} ^2 + G_{шн}}$ $R_{шнa}^{(6a)} = \frac{R_{шнa}  y_{11} - Y_{кор} ^2 + G_{шн}}{ y_{21} ^2}$ $R_{шнa}(y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21} - y_{22}Y_{кор})(y_{11} - Y_{кор}^*) + G_{шн}y_{22}$ $Y_{кор}^{(6a)} = \frac{R_{шнa}  y_{11} - Y_{кор} ^2 + G_{шн}}{R_{шнa}  y_{11} - Y_{кор} ^2 + G_{шн}}$
5		$y_{11}^{(вб)} = y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22}$ $y_{12}^{(вб)} = -(y_{11} + y_{22})$ $y_{21}^{(вб)} = -(y_{21} + y_{22})$ $-y_{22}^{(вб)} = y_{22}$	$G_{шн}^{(вб)} = G_{шн}$ $R_{шнa}^{(вб)} = \frac{R_{шнa}  y_{21} ^2}{ y_{21} + y_{22} ^2}$ $Y_{кор}^{(вб)} = \frac{Y_{кор} (y_{21} + y_{22}) - (y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21})}{y_{21}}$
6		$y_{11}^{(ва)} = y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22}$ $y_{12}^{(ва)} = -(y_{11} + y_{21})$ $y_{21}^{(ва)} = -(y_{11} + y_{12})$ $y_{22}^{(ва)} = y_{11}$	$G_{шн}^{(ва)} = \frac{G_{шн} R_{шнa}  y_{21} ^2}{R_{шнa}  y_{11} - Y_{кор} ^2 + G_{шн}}$ $R_{шнa}^{(ва)} = \frac{R_{шнa}  y_{11} - Y_{кор} ^2 + G_{шн}}{ y_{11} + y_{12} ^2}$ $Y_{кор}^{(ва)} = \frac{R_{шнa} [y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21} - Y_{кор}(y_{21} + y_{22})] (y_{11} - Y_{кор}^*)}{R_{шнa}  y_{11} - Y_{кор} ^2 + G_{шн} + Y_{кор} (y_{21} + y_{22})}$

Для определения первичных шумовых параметров воспользуемся зависимостями между шумовыми токами и напряжениями в системах  $a$  и  $z$ , приведенными в табл. 4.1:

$$\dot{e}_{ш a} = \dot{e}_{ш z1} - \frac{z_{11}}{z_{21}} \dot{e}_{ш z2}; \quad (4.57)$$

$$\dot{i}_{ш a} = -\frac{1}{z_{21}} \dot{e}_{ш z2}. \quad (4.58)$$

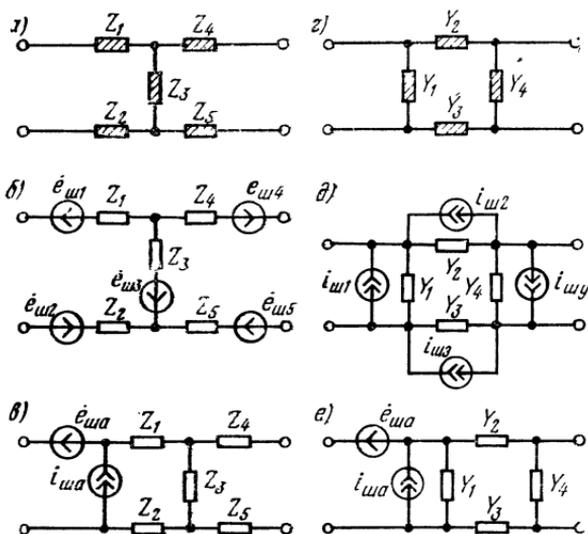


Рис. 4.10. Шумящие пассивные четырехполюсники (а), (с), с вынесенными источниками шума (б), (д), отнесенными ко входу (е), (е)

Подставляя эти выражения и составляющие  $z$ -параметров в (4.34), учитывая  $e_{ш z1} e_{ш z2}^* = 4kTr_{ш z1} \Delta f$ , после выкладок получим

$$Z_{кор} = z_{11} - \frac{r_{ш z1} z_{21}}{r_{ш z2}}. \quad (4.59)$$

Используя

$$\begin{aligned} |e_{ш a}|^2 &= |e_{ш z1}|^2 - |Z_{кор}|^2 |i_{ш a}|^2 = |e_{ш z1}|^2 - |e_{ш z1} e_{ш z2}^*|^2 \times \\ &\times |e_{ш z2}|^{-2}, \quad |e_{ш z1}|^2 = |e_{ш 11}|^2, \end{aligned}$$

после соответствующих подстановок найдем

$$R_{\text{шн}} = r_{\text{ш11}} - \frac{r_{\text{ш12}}^2}{r_{\text{ш22}}} . \quad (4.60)$$

Из (4.58) определим  $|\overline{i_{\text{шa}}}|^2 = |z_{21}|^{-2} |\overline{e_{\text{шz2}}}|^2$ , после подстановки  $|e_{\text{шz2}}|^2 = |\overline{e_{\text{шz2}}}|^2$  и перехода к шумовым сопротивлениям, получим

$$G_{\text{шa}} = \frac{r_{\text{ш22}}}{|z_{21}|^2} . \quad (4.61)$$

Если шумящий четырехполюсник представлен П-образной схемой замещения (рис. 4.10г, д, е) и охарактеризован системой  $y$ -параметров:  $y_{11} = g_{11} - ib_{11}$ ,  $y_{12} = g_{12} - ib_{12}$  и  $y_{22} = g_{22} - ib_{22}$ , — то средние квадраты шумовых токов  $|\overline{i_{\text{ш11}}}|^2 = 4kT\Delta f g_{\text{ш11}}$ ,  $|\overline{i_{\text{ш12}}}|^2 = 4kT\Delta f g_{\text{ш12}}$  и  $|\overline{i_{\text{ш22}}}|^2 = 4kT\Delta f g_{\text{ш22}}$ ; шумовые параметры пассивного четырехполюсника в этом случае находятся из соотношений между шумовыми токами и напряжениями в системах  $a$  и  $y$  из табл. 4.1:

$$\dot{e}_{\text{шa}} = - \frac{1}{y_{21}} i_{\text{шy2}} , \quad (4.62)$$

$$i_{\text{ша}} = i_{\text{шy1}} - \frac{y_{11}}{y_{21}} i_{\text{шy2}} . \quad (4.63)$$

Подставляя эти выражения и составляющие  $y$ -параметров в (4.49), учитывая  $\overline{i_{\text{шy1}} i_{\text{шy2}}^*} = 4kT\Delta f g_{\text{ш12}}$ , найдем

$$Y_{\text{кор}} = y_{11} - \frac{g_{\text{ш12}} y_{21}}{g_{\text{ш22}}} . \quad (4.64)$$

Используя те же выражения, определим  $|\overline{i_{\text{шн}}}|^2 = |\overline{i_{\text{ша}}}|^2 - |\overline{e_{\text{ша}}}|^2 |Y_{\text{кор}}|^2 = |\overline{i_{\text{шy1}}}|^2 - |\overline{i_{\text{шy1}} i_{\text{шy2}}^*}|^2 |\overline{i_{\text{шy2}}}|^{-2}$ , а после подстановки  $|\overline{i_{\text{шy1}}}|^2 = |\overline{i_{\text{ш11}}}|^2$ ,  $|\overline{i_{\text{шy2}}}|^2 = |\overline{i_{\text{ш22}}}|^2$  и перехода к шумовым проводимостям, определим

$$G_{\text{шн}} = g_{\text{ш11}} - \frac{g_{\text{ш12}}^2}{g_{\text{ш22}}} . \quad (4.65)$$

Затем из (4.62), после перехода к шумовым проводимостям, получим

$$R_{\text{ша}} = \frac{g_{\text{ш22}}}{|y_{21}|^2} . \quad (4.66)$$

По своему смыслу и значению первичные шумовые параметры пассивных четырехполюсников тождественны одноименным показателям активных элементов. Они в

полной мере характеризуют их флуктуационные свойства и наиболее удобны для расчета шумов.

Полученные формулы распространяются на все четырехполюсные пассивные цепи, в том числе, содержащие не только тепловые источники шума, но и флуктуации иного происхождения. Формулы первичных шумовых параметров ряда составных шумящих четырехполюсников, наиболее широко применяемых на практике, полученные с помощью выведенных выше обобщенных формул, приведены в табл. 4.4—4.7. Первичные шумовые параметры, в полной мере учитывая шумовые свойства четырехполюсника, вместе с тем непосредственно не отображают влияния его внутренних флуктуаций на отношение сигнал/шум.

#### 4.5. ВТОРИЧНЫЕ ШУМОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Изменение отношения сигнал/шум, происходящее при передаче сигнала через шумящий четырехполюсник, характеризует коэффициент шума, который, используя соотношения табл. 2.3, можно записать в таком виде:

$$F = \frac{P_{ш2}}{P_{ш1}K_P}. \quad (4.67)$$

Во избежание излишних усложнений условимся, что шумы источника сигнала порождаются только тепловыми флуктуациями его внутреннего сопротивления, а нагрузка не учитывается — рассматривается четырехполюсник. Полная мощность шума на выходе последнего содержит в себе составляющую флуктуаций сопротивления источника сигнала, поэтому

$$P_{ш2} = P'_{ш2} + P_{ш1}K_P, \quad (4.68)$$

где  $P'_{ш2}$  — часть полной шумовой мощности, обусловленная только флуктуациями четырехполюсника.

Подставляя (4.68) в (4.67), получим

$$F = \frac{P'_{ш2} + P_{ш1}K_P}{P_{ш1}K_P} = \frac{P'_{ш2}}{P_{ш1}K_P} + 1. \quad (4.69)$$

Первое слагаемое в этом выражении показывает, во сколько раз шумы четырехполюсника превосходят шумы сопротивления источника сигнала

$$F_n = \frac{P_{ш2}}{P_{ш1}K_P}, \quad (4.70)$$

Таблица 4.4

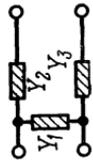
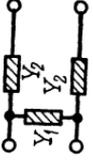
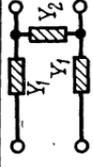
№ п/п	Схема четырехполюсника	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шн}$	$G_{шн}$	$Z_{кор}$
1		$2R_{шн1} + \frac{R_{шн2}(R_{шн3} + R_{шн4})}{R_{шн2} + R_{шн3} + R_{шн4}}$	$\frac{R_{шн2} + R_{шн3} + R_{шн4}}{ Z_2 ^2}$	$2Z_1 + \frac{Z_2(R_{шн3} + R_{шн4})}{R_{шн2} + R_{шн3} + R_{шн4}}$
2		$\frac{R_{шн1}(R_{шн2} + R_{шн3})}{R_{шн1} + R_{шн2} + R_{шн3}}$	$\frac{R_{шн1} + R_{шн2} + R_{шн3}}{ Z_1 ^2}$	$\frac{Z_1(R_{шн2} + R_{шн3})}{R_{шн1} + R_{шн2} + R_{шн3}}$
3		$\frac{2R_{шн1} R_{шн2}}{R_{шн1} + 2R_{шн2}}$	$\frac{R_{шн1} + 2R_{шн2}}{ Z_1 ^2}$	$\frac{2Z_1 R_{шн2}}{R_{шн1} + 2R_{шн2}}$
4		$R_{шн1} + R_{шн3}$	$\frac{R_{шн2}}{ Z_2 ^2}$	$Z_1 + Z_3$
5		$2R_{шн1}$	$\frac{R_{шн2}}{ Z_2 ^2}$	$2Z_1$

№ п/п	Схема четырехполюсника	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шн}$	$G_{шд}$	$Z_{кор}$
6		$R_{ш1} + \frac{R_{ш2}R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}}$	$\frac{R_{ш2} + R_{ш3}}{ Z_3 ^2}$	$Z_1 + \frac{Z_3 R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}}$
7		$R_{ш1} \left( 1 + \frac{R_{ш2}}{R_{ш1} + R_{ш2}} \right)$	$\frac{R_{ш1} + R_{ш2}}{ Z_2 ^2}$	$Z_1 + \frac{Z_2 R_{ш1}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$
8		$R_{ш1}$	$\frac{R_{ш2}}{ Z_2 ^2}$	$Z_1$
9		$\frac{R_{ш1}R_{ш2}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$	$\frac{R_{ш1} + R_{ш2}}{ Z_1 ^2}$	$\frac{Z_1 R_{ш2}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$
10		—	$\frac{R_{ш}}{ Z_1 ^2}$	—

Таблица 4.5

№ ш.	Схема четырехполюсника	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шн}$	$G_{шд}$	$Z_{кор}$
1		$R_{ш1}$	$\frac{R_{ш3}}{ Z_2 ^2}$	$Z_1 + Z_2$
2		$\frac{R_{ш2}R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}}$	$\frac{R_{ш2} + R_{ш3}}{ Z_2 ^2}$	$Z_1 + \frac{Z_2 R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}}$
3		$R_{ш1}$	$\frac{R_{ш2}}{ Z_2 ^2}$	$Z_1$
4		$R_{ш1}$	—	$Z_1 + Z_2$
5		—	$\frac{R_{ш3}}{ Z_2 ^2}$	$Z_1 + Z_2$
6		—	$\frac{R_{ш2}}{ Z_2 ^2}$	$Z_1$
7		$R_{ш1}$	—	$Z_1 + Z_2$
8		—	$\frac{R_{ш2}}{ Z_2 ^2}$	$Z_1$
9		—	$\frac{R_{ш2}}{ Z_1 ^2}$	$Z_1$
10		—	$\frac{R_{ш1}}{ Z_1 ^2}$	—

Таблица 4.6

№ п/п	Схема четырехполюсника	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шз}$	$G_{шн}$	$Y_{кэр}$
1		$\frac{2(G_{ш2} + 2G_{ш3})}{ Y_2 ^2}$	$G_{ш1} + G_{ш2} \frac{G_{ш3}}{G_{ш2} + 2G_{ш3}}$	$Y_1 + Y_2 \frac{G_{ш3}}{G_{ш2} + 2G_{ш3}}$
2		$\frac{G_{ш13}}{ Y_2 ^2}$	$G_{ш1}$	$Y_1$
3		$\frac{2G_{ш2}}{ Y_2 ^2}$	$G_{ш1}$	$Y_1$
4		$\frac{G_{ш13} + G_{ш2}}{ Y_1 ^2}$	$G_{ш13} \frac{G_{ш2}}{G_{ш13} + G_{ш2}}$	$Y_1 \frac{G_{ш2}}{G_{ш13} + G_{ш2}}$
5		$\frac{2(G_{ш1} + 2G_{ш2})}{ Y_1 ^2}$	$G_{ш1} \frac{G_{ш2}}{G_{ш1} + 2G_{ш2}}$	$Y_1 \frac{G_{ш2}}{G_{ш1} + 2G_{ш2}}$

Продолжение табл. 4.6

№ пп.	Схема четырехполюсника	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шз}$	$G_{шн}$	$Y_{шор}$
6		$\frac{G_{шз} + G_{ш3}}{ Y_2 ^2}$	$G_{ш1} + G_{ш2} \frac{G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}}$	$Y_1 + Y_2 \frac{G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}}$
7		$\frac{G_{ш1} + G_{ш2}}{ Y_2 ^2}$	$G_{ш1} \left( 1 + \frac{G_{ш2}}{G_{ш1} + G_{ш2}} \right)$	$Y_1 + Y_2 \frac{G_{ш1}}{G_{ш1} + G_{ш2}}$
8		$\frac{G_{ш2}}{ Y_2 ^2}$	$G_{ш1}$	$Y_1$
9		$\frac{G_{ш1} + G_{ш2}}{ Y_1 ^2}$	$G_{ш1} \frac{G_{ш2}}{G_{ш1} + G_{ш2}}$	$Y_1 \frac{G_{ш2}}{G_{ш1} + G_{ш2}}$
10		$\frac{G_{ш}}{ Y ^2}$	—	—

Таблица 4.7

№ шл.	Схема четырёхполюсника	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шa}$	$G_{шн}$	$Y_{кор}$
1		$\frac{G_{ш3}}{ Y_2 ^2}$	$G_{ш1}$	$Y_1 + Y_2$
2		$\frac{G_{ш2} + G_{ш3}}{ Y_2 ^2}$	$\frac{G_{ш2}G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}}$	$Y_1 + \frac{Y_2G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}}$
3		$\frac{G_{ш2}}{ Y_2 ^2}$	$G_{ш1}$	$Y_1$
4		—	$G_{ш1}$	$Y_1 + Y_2$
5		$\frac{G_{ш3}}{ Y_2 ^2}$	—	$Y_1 + Y_2$
6		$\frac{G_{ш2}}{ Y_2 ^2}$	—	$Y_1$
7		$\frac{G_{ш1}}{ Y_1 ^2}$	—	—
8		$\frac{G_{ш2}}{ Y_1 ^2}$	—	$Y_1$
9		$\frac{G_{ш2}}{ Y_2 ^2}$	—	$Y_1$
10		—	$G_{ш1}$	$Y_1 + Y_2$

и представляет избыточный коэффициент шума, который на единицу меньше величины, определяемой по (4.67),

$$F_{\text{и}} = F - 1. \quad (4.71)$$

Для выяснения характера зависимости избыточного коэффициента шума от сопротивления источника сигнала выразим его через шумовые напряжения:

$$F_{\text{и}} = \frac{|\overline{e_{\text{ш}}^{(P)}}|^2 - |\overline{e_{\text{ш}}}|^2}{|\overline{e_{\text{ш}}}|^2} = \frac{|\overline{e_{\text{ш}}^{(P)}}|^2}{|\overline{e_{\text{ш}}}|^2} - 1. \quad (4.72)$$

Переходя от шумовых напряжений к их эквивалентным сопротивлениям, согласно (4.72) получим

$$F_{\text{и}} = \frac{R_{\text{ш}}^{(P)}}{R_{\text{ш1}}} - 1 \quad (4.73)$$

и далее, используя (4.45), найдем

$$F_{\text{и}} = \frac{R_{\text{шн}} + G_{\text{ш а}} |Z_1 + Z_{\text{кор}}|^2}{R_{\text{ш1}}}. \quad (4.74)$$

Избыточный коэффициент шума, как видно из (4.74), зависит от сопротивления источника сигнала  $Z_1$  и корреляционного сопротивления шума  $Z_{\text{кор}}$ . В общем случае то и другое являются комплексными величинами, но различаются тем, что вещественная составляющая корреляционного сопротивления бесшумна.

Для определения оптимального значения избыточного коэффициента шума как функции вещественной составляющей источника сигнала продифференцируем (4.74) по  $R_{\text{ш1}}$  и, приравняв производную нулю  $dF_{\text{и}}/dR_{\text{ш1}}=0$ , решим полученное уравнение. После несложных выкладок найдем значение вещественной составляющей сопротивления  $Z_1$ , при котором достигается оптимальный избыточный коэффициент шума

$$\begin{aligned} R_{1\text{опт}} &= \left[ \frac{R_{\text{шн}}}{G_{\text{ш а}}} + R_{\text{кор}}^2 + (X_1 + X_{\text{кор}})^2 \right]^{1/2} = \\ &= \left( \frac{R_{\text{шн}}}{G_{\text{ш а}}} + |iX_1 + Z_{\text{кор}}|^2 \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (4.75)$$

Равенство (4.75), при котором достигается оптимальный коэффициент шума, называется *условием шумового согласования* четырехполюсника. Сущность его заклю-

чается в том, что если сопротивление источника сигнала имеет реактивный характер, то коэффициент шума можно уменьшить за счет изменения вещественной составляющей, следуя условию шумового согласования.

Подставляя (4.75) в (4.45), найдем результирующее шумовое сопротивление при оптимальной вещественной составляющей внутреннего сопротивления источника сигнала

$$R_{ш\text{ опт}}^{(p)} = R_{ш1\text{ опт}} + R_{шн} + G_{ша} |Z_1 + Z_{кор}|^2 = \left( \frac{R_{шн}}{G_{ша}} + |iX_1 + Z_{кор}|^2 \right)^{1/2} + R_{шн} + G_{ша} |Z_1 + Z_{кор}|^2, \quad (4.76)$$

которое можно также представить в виде уравнения квадратичной параболы  $y = ax^2 + bx + c$ , но с расположенной в точках  $x_0 = -b/2a = -x_{кор}$  и  $y_0 = (4ac - b^2)/4a = R_{ш1} + R_{шн} + G_{ша}(R_1 + R_{кор})^2$  вершиной. Из (4.76) также следует, что результирующее шумовое сопротивление зависит не только от внутреннего сопротивления источника сигнала, но и от корреляционного сопротивления шума.

На рис. 4.11а представлена зависимость результирующего шумового сопротивления от реактивной составляющей

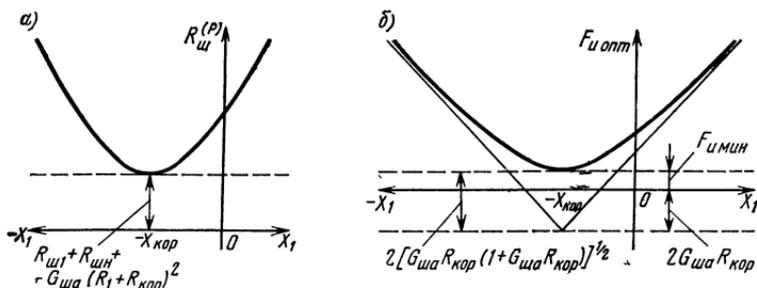


Рис. 4.11. Зависимость сопротивления источника сигнала от реактивной составляющей.

а) результирующего шумового сопротивления, б) оптимально избыточного коэффициента шума

ляющей внутреннего сопротивления источника сигнала. Весьма примечательным в этой зависимости является то, что минимальная величина результирующего шумового сопротивления при наличии статистической связи между источниками шума достигается не при равенстве нулю реактивной составляющей внутреннего сопротивления источника сигнала.

Подставив (4.75) в (4.74), найдем оптимальный избыточный коэффициент шума

$$F_{\text{н опт}} = 2G_{\text{ш } a} \left[ \left( \frac{R_{\text{шн}}}{G_{\text{ш } a}} + |iX_1 + Z_{\text{кор}}|^2 \right)^{1/2} + R_{\text{кор}} \right] = \\ = 2G_{\text{ш } a} (R_{1\text{опт}} + R_{\text{кор}}). \quad (4.77)$$

Оптимальная величина избыточного коэффициента шума, как видно из (4.77), зависит от реактивных составляющих сопротивления источника сигнала и корреляционного сопротивления шума, поэтому возможно удовлетворение равенства

$$X_{\text{кор}} = -X_1. \quad (4.78)$$

При выполнении его происходит взаимная компенсация реактивных составляющих сопротивления источника сигнала и корреляционного сопротивления шума, поэтому оно называется *условием шумового сопряжения* четырехполюсника. Равенству (4.78) соответствует минимальная величина активной составляющей сопротивления источника сигнала

$$R_{1\text{мин}} = \left( \frac{R_{\text{шн}}}{G_{\text{ш } a}} + R_{\text{кор}}^2 \right)^{1/2}, \quad (4.79)$$

при которой достигается минимальный избыточный коэффициент шума четырехполюсника

$$F_{\text{н мин}} = 2G_{\text{ш } a} \left[ \left( \frac{R_{\text{шн}}}{G_{\text{ш } a}} + R_{\text{кор}}^2 \right)^{1/2} + R_{\text{кор}} \right] = \\ = 2G_{\text{ш } a} (R_{1\text{мин}} + R_{\text{кор}}). \quad (4.80)$$

Обобщая используемые для электронных ламп и транзисторов понятия, представляется целесообразным принять в качестве *вторичных шумовых параметров* четырехполюсника:

—  $F_{\text{н мин}}$  — наименьший избыточный коэффициент шума, который может быть достигнут при произвольном варьировании сопротивлением источника сигнала;

—  $Z_{1\text{мин}}$  — сопротивление источника сигнала, при котором достигается наименьший избыточный коэффициент шума.

Между первичными и вторичными шумовыми параметрами четырехполюсника существует строгая взаимосвязь, отображаемая (4.79—4.80). Выражение (4.77) после несложных преобразований приводится к виду

$$\frac{(F_{\text{н опт}} - 2G_{\text{ш } a}R_{\text{кор}})^2}{\left( 2\sqrt{G_{\text{ш } a}R_{\text{шн}} + G_{\text{ш } a}^2R_{\text{кор}}^2} \right)^2} = \frac{(X_1 + X_{\text{кор}})^2}{\left( \sqrt{\left( \frac{R_{\text{шн}}}{G_{\text{ш } a}} + R_{\text{кор}}^2 \right)} \right)^2} = 1, \quad (4.81)$$

которое является ничем иным, как уравнением смещенной относительно координатных осей гиперболы (рис. 4.11б) с вершиной, удаленной от точки пересечения асимптот на отрезок  $a = 2(G_{\text{ша}}R_{\text{шн}} + G_{\text{ша}}^2R_{\text{кор}}^2)^{1/2}$  и угловым

$$\text{коэффициентом } k = \pm \operatorname{tg} \delta = \pm \left( \frac{R_{\text{шн}}/G_{\text{ша}} a + R_{\text{кор}}^2}{2(G_{\text{ша}} a R_{\text{шн}} + G_{\text{ша}}^2 R_{\text{кор}}^2)} \right)^{1/2}$$

Минимальная величина оптимального избыточного коэффициента шума соответствует вершине гиперболы и достигается при выполнении условия (4.78).

*Граничный случай 1.*  $|\gamma_a| = 0$ . Корреляционное сопротивление шума, определяемое (4.34), при отсутствии статистической связи между источниками шума обращается в нуль, и флуктуационные свойства четырехполосника полностью описываются двумя первичными шумовыми параметрами:  $R_{\text{ша}}$  и  $G_{\text{ша}}$ . Избыточный коэффициент шума при отсутствии корреляционной связи находится подстановкой в (4.74)  $Z_{\text{кор}} = 0$ :

$$F_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{ша}} + G_{\text{ша}} |Z_1|^2}{R_{\text{шн}}} \quad (4.82)$$

Оптимальная величина его достигается при выполнении условия шумового согласования (4.75), которое принимает вид

$$R_{1\text{опт}} = \left( \frac{R_{\text{ша}}}{G_{\text{ша}}} + X_1^2 \right)^{1/2} \quad (4.83)$$

Подставив (4.83) в (4.82), получим

$$\begin{aligned} F_{\text{ш опт}} &= \frac{1}{R_{\text{шн опт}}} [R_{\text{ша}} + G_{\text{ша}} (R_{\text{шн опт}} + X_1^2)] = \\ &= 2G_{\text{ша}} \left( \frac{R_{\text{ша}}}{G_{\text{ша}}} + X_1^2 \right)^{1/2} = 2G_{\text{ша}} R_{\text{шн опт}}. \end{aligned} \quad (4.84)$$

Минимальный избыточный коэффициент шума при некоррелированных источниках флуктуаций, как следует из (4.80), достигается при  $X_1 = 0$  и равен

$$F_{\text{ш мин}} = 2(R_{\text{ша}}G_{\text{ша}})^{1/2}. \quad (4.85)$$

*Граничный случай 2.*  $|\gamma_a| = 1$ . Между источниками шума  $e_{\text{ша}}$  и  $i_{\text{ша}}$  существует простая функциональная связь. Корреляционное сопротивление шума, согласно (4.34),

$$Z_{\text{кор}} = \left( \frac{|e_{\text{ша}}|^2}{|i_{\text{ша}}|^2} \right)^{1/2} = R_{\text{кор}}. \quad (4.86)$$

Избыточный коэффициент шума после подстановки (4.86) в (4.74) принимает вид

$$F_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{ша}} + G_{\text{ша}} |Z_1 + R_{\text{кор}}|^2}{R_{\text{шн}}}. \quad (4.87)$$

Оптимальная величина его, как следует из (4.77), достигается при

$$R_{1\text{опт}} = \left( \frac{R_{\text{ша}}}{G_{\text{ша}}} + R_{\text{кор}}^2 + X_1^2 \right)^{1/2} = \left( \frac{R_{\text{ша}}}{G_{\text{ша}}} + |iX_1 + R_{\text{кор}}|^2 \right)^{1/2} \quad (4.88)$$

и равна

$$\begin{aligned} F_{\text{и опт}} &= \frac{R_{\text{ша}} + G_{\text{ша}} [(R_{1\text{опт}} + R_{\text{кор}})^2 + X_1^2]}{R_{1\text{опт}}} = \\ &= 2G_{\text{ша}} \left[ \left( \frac{R_{\text{ша}}}{G_{\text{ша}}} + |iX_1 + R_{\text{кор}}|^2 \right)^{1/2} + R_{\text{кор}} \right] = 2G_{\text{ша}} (R_{1\text{опт}} + R_{\text{кор}}). \end{aligned} \quad (4.89)$$

Приведенные соотношения охватывают возможные случаи статистической связи между эквивалентными источниками шума четырехполюсника.

Использование тех или иных соотношений зависит от конкретных условий и определяется на основе предварительных расчетов или по экспериментальным данным.

Формулы (4.73)—(4.89) получены для системы шумовых параметров с корреляционным сопротивлением шума. Сопоставив структуры этих выражений с формулами для системы шумовых параметров с корреляционной проводимостью шума [65, 123], можно убедиться в их идентичности. Для получения шумовых параметров во второй системе достаточно в приведенных формулах произвести замену шумовых параметров:  $R_{\text{шн}} \rightarrow G_{\text{шн}}$ ,  $R_{\text{ша}} \rightarrow G_{\text{ша}}$ ,  $Z_{\text{кор}} \rightarrow Y_{\text{кор}}$ , а также величин:  $Z_1 \rightarrow Y_1$ ,  $R_{\text{ш1}} \rightarrow G_{\text{ш1}}$ ,  $R_{1\text{ опт}} \rightarrow G_{1\text{ опт}}$ ,  $R_{1\text{ мин}} \rightarrow G_{1\text{ мин}}$ .

Замена одной системы шумовых параметров другой по предлагаемому принципу позволяет избежать пересчета их при расчете шумов цепей, представленных проводимостями. Если же по каким-либо обстоятельствам необходимо перейти от проводимостей к сопротивлениям, то замена шумовых параметров происходит в обратном порядке.

#### 4.6. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ШУМОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Особый интерес представляет случай, когда шумящий четырехполюсник нагружен на сопротивления, равные характеристическим. Не останавливаясь на известных из теории сигнальных цепей определениях, напомним, что

при нагрузке четырехполюсника на характеристические сопротивления выполняются условия:

$$Z_1 = Z_{c1} = Z_{вх}, \quad Z_2 = Z_{c2} = Z_{вых}. \quad (4.90)$$

При выполнении равенства (4.90) четырехполюсник идеально согласован для передачи сигнала и отражения в точках подключения источника и нагрузки отсутствуют. Такой режим обладает многими достоинствами и на его основе создано большое число ставших классическими методов расчета электрических цепей [5, 6, 18, 34, 47, 100].

Для выяснения крайне важных вопросов влияния несогласованности на изменение отношения сигнал/шум режим согласованного включения шумящего четырехполюсника оказывается ключевым. Он позволяет установить полезные во многих отношениях зависимости между шумовыми токами и напряжениями нагруженного четырехполюсника.

Передающие свойства четырехполюсника при согласованном включении определяются, как известно, характеристическими (собственными) постоянными [18, 63]:

— при передаче слева направо

$$g_{c1} = \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_1 i_1'}{\dot{U}_2 i_2'}, \quad \left( g_{c1} = 10 \lg \frac{\dot{U}_1 i_1'}{\dot{U}_2 i_2'} \right); \quad (4.91)$$

— при передаче справа налево

$$g_{c2} = \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_1' i_1''}{\dot{U}_2' i_2''}, \quad \left( g_{c2} = 10 \lg \frac{\dot{U}_1' i_1''}{\dot{U}_2' i_2''} \right). \quad (4.92)$$

Характеристические сопротивления четырехполюсника связаны с  $a$ -параметрами:

$$Z_{c1} = \left( \begin{matrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{matrix} \right)^{1/2}, \quad Z_{c2} = \left( \begin{matrix} a_{22} & a_{12} \\ a_{11} & a_{21} \end{matrix} \right)^{1/2}. \quad (4.93)$$

Воспользовавшись соотношениями табл. П. 1, можно выразить их в других принятых системах параметров.

Характеристические постоянные передачи в общем случае являются комплексными величинами  $g_{c1} = a_{c1} + ib_{c1}$ ,  $g_{c2} = a_{c2} + ib_{c2}$ , где  $a_{c1}$  и  $a_{c2}$  — характеристические затухания (усиления);  $b_{c1}$  и  $b_{c2}$  — характеристические фазовые постоянные четырехполюсника.

Характеристические параметры  $Z_{c1}$ ;  $Z_{c2}$  и  $g_{c1}$ ,  $g_{c2}$  полностью определяют сигнальные свойства четырехполюсника. Они идентичны волновым показателям цепей распределенной структуры.

Выясним шумовые зависимости в четырехполюснике, нагруженном на сопротивления, равные характеристическим (рис. 4.12). Под воздействием внутренних флуктуаций источника сигнала  $e_{ш1}(i_{ш1})$ , четырехполюсника  $e_{шз1}$  и  $e_{шз2}(i_{шз1}$  и  $i_{шз2})$  и нагрузки  $e_{ш2}(i_{ш2})$  между выводами возникают шумовые токи и напряжения. Ввиду независимости шумовых источников всех трех составляющих применим принцип наложения.

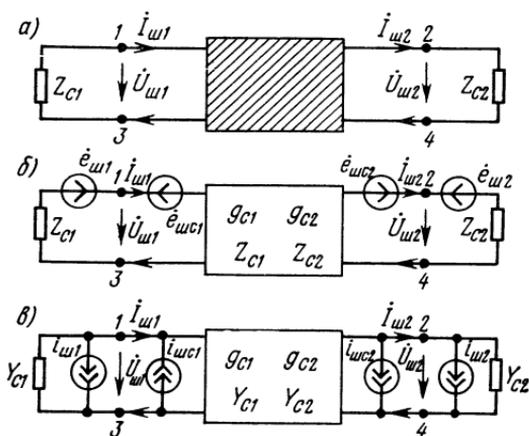


Рис. 4.12. Шумящий четырехполюсник с характеристическими нагрузками (а), вынесенными источниками шумового напряжения (б), шумового тока (в)

Под влиянием внутренних флуктуаций четырехполюсника во внешних цепях его возникают шумовые токи  $i_{ш1} = i_{шс1}$ ,  $i_{ш2} = i_{шс2}$  и напряжения  $U_{ш1} = U_{шс1}$ ,  $U_{ш2} = U_{шс2}$ , которые в обратимом четырехполюснике названы характеристическими [34, 110]. Распространив эти понятия на общий случай — необратимый шумящий четырехполюсник, — найдем характеристические напряжения и токи, выразив их через шумовые токи и напряжения в рассмотренных ранее системах параметров. Для этого воспользуемся известными соотношениями и после соответствующих подстановок получим формулы табл. 4.8—4.9.

	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
			
1a	$\dot{U}_{шc1} = \frac{1}{2} (\dot{e}_{шa} - Z_{c1} i_{шa})$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{шa} - Z_{c1} i_{шa})$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{шa} - Z_c i_{шa})$
1b	$= -\frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_{c2}} (\dot{e}_{шb} - Z_{c2} i_{шb})$	$= -\frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_c} (\dot{e}_{шb} - Z_{c2} i_{шb})$	$= -\frac{1}{2} e^{-g_c} (\dot{e}_{шb} - Z_c i_{шb})$
1h	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{шh} + (Z_{c1} Z_{c2}) \frac{1}{2} e^{-g_{c2}} i_{шh} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{шh} + (Z_{c1} Z_{c2}) \frac{1}{2} e^{-g_c} i_{шh} \right]$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{шh} + e^{-g_c} i_{шh})$
1f	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_{c2}} \dot{e}_{шf} + Z_{c1} i_{шf} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_c} \dot{e}_{шf} + Z_{c1} i_{шf} \right]$	$= -\frac{1}{2} (e^{-g_c} \dot{e}_{шf} + Z_c i_{шf})$
1z	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{шz1} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_{c2}} \dot{e}_{шz2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{шz1} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_c} \dot{e}_{шz2} \right]$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{шz1} - e^{-g_c} \dot{e}_{шz2})$

	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
1y	$= -\frac{1}{2} \left[ Z_{c1} i_{\text{ш}y1} - (Z_{c1} Z_{c2})^2 e^{-g_{c2}} i_{\text{ш}y2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ Z_{c1} i_{\text{ш}y1} - (Z_{c1} Z_{c2})^2 e^{-g_{c2}} i_{\text{ш}y2} \right]$	$= -\frac{1}{2} (Z_{c1}^2 i_{\text{ш}y1} - e^{-g_c} i_{\text{ш}y2})$
2a	$i_{\text{ш}c1} = -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{\text{ш}a} - i_{\text{ш}a} \right)$	$= -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{\text{ш}a} - i_{\text{ш}a} \right)$	$= -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z_c} \dot{e}_{\text{ш}a} - i_{\text{ш}a} \right)$
2b	$= \frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2})^2 e^{-g_{c2}} (\dot{e}_{\text{ш}b} - Z_{c2} i_{\text{ш}b})$	$= \frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2})^2 e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{ш}b} - Z_{c2} i_{\text{ш}b})$	$= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z_c} e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{ш}b} - Z_c i_{\text{ш}b}) \right)$
2h	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{\text{ш}h} + \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_{c2}} i_{\text{ш}h} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{\text{ш}h} + \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_c} i_{\text{ш}h} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z_c} \dot{e}_{\text{ш}h} + e^{-g_c} i_{\text{ш}h} \right)$
2f	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^2 e^{-g_{c2}} \dot{e}_{\text{ш}f} + i_{\text{ш}f} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^2 e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}f} - i_{\text{ш}f} \right]$	$= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z_c} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}f} + i_{\text{ш}f} \right)$

№ п/п	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
2r	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{\text{ш}z1} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} \frac{1}{2} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{\text{ш}z2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{\text{ш}z1} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} \frac{1}{2} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}z2} \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} (\dot{e}_{\text{ш}z1} - e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}z2})$
2y	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{i}_{\text{ш}y1} - \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_{c2}} \dot{i}_{\text{ш}y2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{i}_{\text{ш}y1} - \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_c} \dot{i}_{\text{ш}y2} \right]$	$= \frac{1}{2} (\dot{i}_{\text{ш}y1} - e^{-g_c} \dot{i}_{\text{ш}y2})$
3a	$\dot{U}_{\text{ш}c2} = -\frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_{c1}} (\dot{e}_{\text{ш}a} + Z_{c1} \dot{i}_{\text{ш}a})$	$= -\frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{ш}a} + Z_{c1} \dot{i}_{\text{ш}a})$	$= -\frac{1}{2} e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{ш}a} + Z_c \dot{i}_{\text{ш}a})$
3b	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{\text{ш}b} + Z_{c2} \dot{i}_{\text{ш}b})$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{\text{ш}b} + Z_{c2} \dot{i}_{\text{ш}b})$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{\text{ш}b} + Z_c \dot{i}_{\text{ш}b})$
3h	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_{c1}} \dot{e}_{\text{ш}h} - Z_{c2} \dot{i}_{\text{ш}h} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}h} - Z_{c2} \dot{i}_{\text{ш}h} \right]$	$= -\frac{1}{2} (e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}h} - Z_c \dot{i}_{\text{ш}h})$



Ш №			$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$		
4h	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}Z_{c2}} e^{-g_{c1}} \dot{e}_{\text{ш}h} - i_{\text{ш}h} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}Z_{c2}} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}h} - i_{\text{ш}h} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z_c} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}h} - i_{\text{ш}h} \right)$	
4f	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{\text{ш}f} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_{c1}} i_{\text{ш}f} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{\text{ш}f} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_c} i_{\text{ш}f} \right]$	$= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z_c} \dot{e}_{\text{ш}f} - e^{-g_c} i_{\text{ш}f} \right)$	
4z	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}Z_{c2}} e^{-g_{c1}} \dot{e}_{\text{ш}z} - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{\text{ш}z} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}Z_{c2}} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}z} - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{\text{ш}z} \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} ( e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}z} - \dot{e}_{\text{ш}z} )$	
4y	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \dot{e}_{\text{ш}y} - i_{\text{ш}y} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} e^{-g_c} i_{\text{ш}y} - i_{\text{ш}y} \right]$	$= -\frac{1}{2} ( e^{-g_c} i_{\text{ш}y} - i_{\text{ш}y} )$	

Таблица 4.9

Величина			$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	
$\dot{e}_{ша}$	$\dot{U}_{шc1} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{g_{c1}} \dot{U}_{шc2}$	$\dot{U}_{шc1} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{g_c} \dot{U}_{шc2}$	$\dot{U}_{шc1} - e^{g_c} \dot{U}_{шc2}$
$i_{ша}$	$-\frac{1}{Z_{c1}} \dot{U}_{шc1} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{g_{c1}} \dot{U}_{шc2}$	$-\frac{1}{Z_{c1}} \dot{U}_{шc1} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{g_c} \dot{U}_{шc2}$	$-\frac{1}{Z_c} (\dot{U}_{шc1} + e^{g_c} \dot{U}_{шc2})$
$\dot{e}_{шb}$	$-\left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{g_{c2}} \dot{U}_{шc1} + \dot{U}_{шc2}$	$-\left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{g_c} \dot{U}_{шc1} + \dot{U}_{шc2}$	$-e^{g_c} \dot{U}_{шc1} + \dot{U}_{шc2}$
$i_{шb}$	$(Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{g_{c2}} \dot{U}_{шc1} + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{U}_{шc2}$	$(Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{g_c} \dot{U}_{шc1} + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{U}_{шc2}$	$\frac{1}{Z_c} (e^{g_c} \dot{U}_{шc1} + \dot{U}_{шc2})$

Региона	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$e_{mh}$	$\left( \frac{g_{c1} + g_{c2}}{2} + 1 \right) \left[ \dot{U}_{mc1} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{U}_{mc2} \right]$	$(\text{th } g_c + 1) \left[ \dot{U}_{mc1} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} \times e^{-g_c} \dot{U}_{mc2} \right]$	$(\text{th } g_c + 1) (\dot{U}_{mc1} - e^{-g_c} \dot{U}_{mc2})$
$i_{mh}$	$-\left( \frac{g_{c1} + g_{c2}}{2} + 1 \right) \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{U}_{mc1} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_{c2}} \dot{U}_{mc2} \right]$	$-(\text{th } g_c + 1) \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{U}_{mc1} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_c} \dot{U}_{mc2} \right]$	$-\frac{1}{Z_c} (\text{th } g_c + 1) (\dot{U}_{mc1} + e^{-g_c} \dot{U}_{mc2})$
$e_{mf}$	$-\left( \frac{\text{th } g_{c1} + g_{c2}}{2} + 1 \right) \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} \times e^{-g_{c1}} \dot{U}_{mc1} + \dot{U}_{mc2} \right]$	$-(\text{th } g_c + 1) \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \times \dot{U}_{mc1} + \dot{U}_{mc2} \right]$	$-(\text{th } g_c + 1) (e^{-g_c} \dot{U}_{mc1} + \dot{U}_{mc2})$
$i_{mf}$	$-\left( \frac{g_{c1} + g_{c2}}{2} + 1 \right) \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{U}_{mc1} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_{c2}} \dot{U}_{mc2} \right]$	$-(\text{th } g_c + 1) \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{U}_{mc1} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_c} \dot{U}_{mc2} \right]$	$-\frac{1}{Z_c} (\text{th } g_c + 1) (\dot{U}_{mc1} + e^{-g_c} \dot{U}_{mc2})$



Продолжение табл. 4.9

Величина	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$e_{\text{шз1}}$	$\left( \text{cth} \frac{g_{c1} + g_{c2}}{2} + 1 \right) \left[ \dot{U}_{\text{шс1}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{U}_{\text{шс2}} \right]$	$(\text{cth} g_c + 1) \left[ \dot{U}_{\text{шс1}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} \times e^{-g_c} \dot{U}_{\text{шс2}} \right]$	$(\text{cth} g_c + 1) (\dot{U}_{\text{шс1}} + e^{-g_c} \dot{U}_{\text{шс2}})$
$e_{\text{шз2}}$	$\left( \text{cth} \frac{g_{c1} + g_{c2}}{2} + 1 \right) \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} \times e^{-g_{c1}} \dot{U}_{\text{шс1}} + \dot{U}_{\text{шс2}} \right]$	$(\text{cth} g_c + 1) \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \times \dot{U}_{\text{шс1}} + \dot{U}_{\text{шс2}} \right]$	$(\text{cth} g_c + 1) (e^{-g_c} \dot{U}_{\text{шс1}} + \dot{U}_{\text{шс2}})$
$i_{\text{шг1}}$	$-\left( \text{cth} \frac{g_{c1} + g_{c2}}{2} + 1 \right) \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{U}_{\text{шс1}} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_{c2}} \dot{U}_{\text{шс2}} \right]$	$-(\text{cth} g_c + 1) \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{U}_{\text{шс1}} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_c} \dot{U}_{\text{шс2}} \right]$	$-\frac{1}{Z_c} (\text{cth} g_c + 1) (\dot{U}_{\text{шс1}} - e^{-g_c} \dot{U}_{\text{шс2}})$
$i_{\text{шг2}}$	$-\left( \text{cth} \frac{g_{c1} + g_{c2}}{2} + 1 \right) \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} \times e^{-g_{c1}} \dot{U}_{\text{шс1}} - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{U}_{\text{шс2}} \right]$	$-(\text{cth} g_c + 1) \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} \times e^{-g_c} \dot{U}_{\text{шс1}} - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{U}_{\text{шс2}} \right]$	$-\frac{1}{Z_c} (\text{cth} g_c + 1) (e^{-g_c} \dot{U}_{\text{шс1}} - \dot{U}_{\text{шс2}})$

Переходя к средним квадратам шумовых величин, получим:

$$\overline{|U_{шc1}|^2} = \frac{1}{4} \overline{|e_{ша} - Z_{c1}i_{ша}|^2}, \quad (4.94)$$

$$\overline{|I_{шc1}|^2} = \frac{1}{4} \overline{\left| \frac{1}{Z_{c1}} e_{ша} - i_{ша} \right|^2}, \quad (4.95)$$

$$\overline{|U_{шc2}|^2} = \frac{1}{4} \left| \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right| e^{-2a_{c1}} \overline{|e_{ша} + Z_{c1}i_{ша}|^2}, \quad (4.96)$$

$$\overline{|I_{шc2}|^2} = \frac{1}{4} |Z_{c1}Z_{c2}|^{-1} e^{-2a_{c1}} \overline{|e_{ша} + Z_{c1}i_{ша}|^2}. \quad (4.97)$$

*Частный случай 1.* Обратимый несимметричный шумящий четырехполюсник  $Z_{c1} \neq Z_{c2}$ ,  $g_{c1} = g_{c2} = g_c$ .

Подставив заданные характеристические величины в (4.94)–(4.97), найдем:

$$\overline{|U_{шc1}|^2} = \frac{1}{4} \overline{|e_{ша} - Z_{c1}i_{ша}|^2}, \quad (4.98)$$

$$\overline{|I_{шc1}|^2} = \frac{1}{4} \overline{\left| \frac{1}{Z_{c1}} e_{ша} - i_{ша} \right|^2}, \quad (4.99)$$

$$\overline{|U_{шc2}|^2} = \frac{1}{4} \left| \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right| e^{-2a_c} \overline{|e_{ша} + Z_{c1}i_{ша}|^2}, \quad (4.100)$$

$$\overline{|I_{шc2}|^2} = \frac{1}{4} |Z_{c1}Z_{c2}|^{-1} e^{-2a_c} \overline{|e_{ша} + Z_{c1}i_{ша}|^2}. \quad (4.101)$$

*Частный случай 2.* Обратимый симметричный шумящий четырехполюсник  $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c$ ,  $g_{c1} = g_{c2} = g_c$ .

Подобно предыдущему после подстановки заданных величин определим:

$$\overline{|U_{шc1}|^2} = \frac{1}{4} \overline{|e_{ша} - Z_c i_{ша}|^2}, \quad (4.102)$$

$$\overline{|I_{шc1}|^2} = \frac{1}{4} \overline{\left| \frac{1}{Z_c} e_{ша} - i_{ша} \right|^2}, \quad (4.103)$$

$$\overline{|U_{шc2}|^2} = \frac{1}{4} e^{-2a_c} \overline{|e_{ша} + Z_c i_{ша}|^2}, \quad (4.104)$$

$$\overline{|I_{шc2}|^2} = \frac{1}{4} e^{-2a_c} \overline{\left| \frac{1}{Z_c} e_{ша} + i_{ша} \right|^2}. \quad (4.105)$$

Исходя из оценки флуктуаций с помощью эквивалентных шумовых сопротивлений и проводимостей, выразим через них характеристические шумовые токи и напряже-

ния. Но предварительно перейдем к источникам характеристических шумовых токов и напряжений:

$$\dot{e}_{ш\ c1} = 2\dot{U}_{ш\ c1} \text{ и } \dot{e}_{ш\ c2} = 2\dot{U}_{ш\ c2}, \quad (4.106)$$

$$i_{ш\ c1} = 2\dot{I}_{ш\ c1} \text{ и } i_{ш\ c2} = 2\dot{I}_{ш\ c2} \quad (4.107)$$

и от них к средним квадратам шумовых токов и напряжений, приняв:

$$\overline{|e_{ш\ c1}|^2} = 4kT \Delta f R_{ш\ c1}, \quad (4.108)$$

$$\overline{|e_{ш\ c2}|^2} = 4kT \Delta f R_{ш\ c2}, \quad (4.109)$$

$$\overline{|i_{ш\ c1}|^2} = 4kT \Delta f G_{ш\ c1}, \quad (4.110)$$

$$\overline{|i_{ш\ c2}|^2} = 4kT \Delta f G_{ш\ c2}. \quad (4.111)$$

Из (4.108) — (4.111) определим эквивалентные характеристические сопротивления шума:

$$R_{ш\ c1} = \frac{\overline{|U_{ш\ c1}|^2}}{kT_0 \Delta f} = \frac{\overline{|e_{ш\ c1}|^2}}{4kT_0 \Delta f}, \quad (4.112)$$

$$R_{ш\ c2} = \frac{\overline{|U_{ш\ c2}|^2}}{kT_0 \Delta f} = \frac{\overline{|e_{ш\ c2}|^2}}{4kT_0 \Delta f} \quad (4.113)$$

или шумовые проводимости:

$$G_{ш\ c1} = \frac{\overline{|I_{ш\ c1}|^2}}{kT_0 \Delta f} = \frac{\overline{|i_{ш\ c1}|^2}}{4kT_0 \Delta f}, \quad (4.114)$$

$$G_{ш\ c2} = \frac{\overline{|I_{ш\ c2}|^2}}{kT_0 \Delta f} = \frac{\overline{|i_{ш\ c2}|^2}}{4kT_0 \Delta f}. \quad (4.115)$$

В общем случае характеристические шумовые напряжения  $\dot{U}_{ш\ c1}$ ,  $\dot{U}_{ш\ c2}$  и токи  $\dot{I}_{ш\ c1}$ ,  $\dot{I}_{ш\ c2}$  статистически зависимы, что учтем характеристическими коэффициентами корреляции [53]:

$$\gamma_c = \frac{\overline{e_{ш\ c1} e_{ш\ c2}^*}}{(\overline{|e_{ш\ c1}|^2} \overline{|e_{ш\ c2}|^2})^{1/2}} \text{ или } \gamma_c = \frac{\overline{i_{ш\ c1} i_{ш\ c2}^*}}{(\overline{|i_{ш\ c1}|^2} \overline{|i_{ш\ c2}|^2})^{1/2}}. \quad (4.116)$$

Таким образом, флуктуационные свойства четырехполюсника, нагруженного на равные характеристические сопротивления, полностью выражаются тремя шумовыми характеристическими параметрами:  $R_{ш\ c1}$ ,  $R_{ш\ c2}$ ,  $\gamma_c$  или  $G_{ш\ c1}$ ,  $G_{ш\ c2}$ ,  $\gamma_c$ . Эти параметры характеризуют интенсивность флуктуаций шумящего четырехполюсника, но как и первичные шумовые параметры не отображают влияния их на отношение сигнал/шум. Для определения из-

менения последнего при передаче сигнала через четырехполюсник в обоих направлениях воспользуемся выражениями коэффициента шума общего вида табл. 2.3, в соответствии с которыми, учтя соотношения (4.71), (4.108) и (4.109), определим:

— при передаче слева направо

$$F_{c_{и1}} = \frac{R_{ш\ c24}}{R_{ш1}} \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{2a_{c1}}; \quad (4.117)$$

— при передаче справа налево

$$F_{c_{и2}} = \frac{R_{ш\ c24}}{R_{ш2}} \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{2a_{c2}}. \quad (4.118)$$

Полученные величины, исходя из принятой терминологии для сигнальных показателей, выше были названы характеристическими (собственными) избыточными коэффициентами шума четырехполюсника. Они являются своего рода постоянными шума четырехполюсника подобно тому, как  $g_{c1}$  и  $g_{c2}$  представляют его постоянные передачи.

Характеристические шумовые величины взаимосвязаны с первичными шумовыми параметрами четырехполюсника. Для определения этой взаимосвязи воспользуемся (4.108)—(4.111) и  $\phi$ -лами табл. 4.18. После ряда промежуточных выкладок и подстановок найдем:

$$R_{ш\ c1} = R_{шн} + G_{ш\ a} |Z_{c1} - Z_{кор}|^2, \quad (4.119)$$

$$R_{ш\ c2} = (R_{шн} + G_{ш\ a} |Z_{c1} + Z_{кор}|^2) \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c1}}. \quad (4.120)$$

и

$$G_{ш\ c1} = G_{шн} + R_{ш\ a} |Y_{c1} - Y_{кор}|^2, \quad (4.121)$$

$$G_{ш\ c2} = (G_{шн} + R_{ш\ a} |Y_{c1} + Y_{кор}|^2) \frac{|Y_{c2}|}{|Y_{c1}|} e^{-2a_{c2}}. \quad (4.122)$$

Для непосредственного определения характеристических шумовых параметров четырехполюсника, в отличие от первичных шумовых параметров, не требуется создания режимов холостого хода и короткого замыкания. Обеспечение последних в практических условиях возможно лишь с определенным приближением, создание же условий согласованного включения четырехполюсника возможно с любой степенью точности.

Характеристические шумовые сопротивления или проводимости могут быть определены непосредственно с помощью шумового генератора (как шумящие двухполюс-

ники), тогда как первичные шумовые параметры  $R_{шн}$ ,  $G_{ша}$  и  $G_{шв}$ ,  $R_{ша}$  пока определяются лишь косвенным путем.

#### 4.7. НЕИЗМЕННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА

Первичные шумовые параметры используются для анализа шумовых свойств электрических цепей и определения условий оптимизации и минимизации коэффициента шума. Но этим не исчерпываются их возможности, особенно если учесть трудности практического осуществления режима шумового согласования в широком диапазоне частот. Зависимость шумовых параметров от частоты, температуры, производственный разброс их, не оговариваемые пока в технической документации, усугубляют положение.

В число задач прикладного характера, помимо перечисленного выше, входит расчет коэффициента шума электрической цепи, спроектированной по отличающимся от шумовых критериям оптимальности. В этом случае коэффициент шума можно рассчитать, не прибегая к определению всех шумовых параметров, ограничившись лишь некоторыми из них.

Используя (4.74) и (4.80), определим разность (приращение) между избыточным коэффициентом шума при произвольном сопротивлении источника сигнала и минимальной величиной его, соответствующей выполнению условий (4.78) и (4.79).

Опустив промежуточные выкладки, определим

$$\Delta F = F_{и} - F_{и\ мин} = G_{ша} R_{1\ мин} \left[ \frac{R_{1\ мин}}{R_1} + \frac{R_1}{R_{1\ мин}} + \frac{(X_1 + X_{кор})^2}{R_1 R_{1\ мин}} - 2 \right] = v \frac{R_{1\ мин}}{R_1} \left[ \left( \frac{R_1}{R_{1\ мин}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{X_1 + X_{кор}}{R_{1\ мин}} \right)^2 \right]. \quad (4.123)$$

В этом выражении сомножитель в квадратных скобках является уравнением окружности

$$\left( \frac{R_1}{R_{1\ мин}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{X_1 + X_{кор}}{R_{1\ мин}} \right)^2 = r^2 \quad (4.124)$$

с ординатой  $R_1/R_{1\ мин}$  и абсциссой  $(X_1 + X_{кор})/R_{1\ мин}$ , центр которой смещен по горизонтальной оси относительно нуля на единицу. Произведение  $G_{ша} R_{1\ мин} = v = \text{const}$  также постоянная величина для четырехполос-

ника, определяемая только эквивалентной шумовой проводимостью и минимальной вещественной составляющей источника сигнала.

Из (4.123) найдем выражение

$$F_{\text{и}} = F_{\text{и мин}} + \nu \frac{R_{1\text{мин}}}{R_1} \left[ \left( \frac{R_1}{R_{1\text{мин}}} - 1 \right)^2 + \left( \frac{X_1 + X_{\text{кор}}}{R_{1\text{мин}}} \right)^2 \right], \quad (4.125)$$

которое показывает, что коэффициент шума при известном сопротивлении источника сигнала можно рассчитать, не имея всех первичных шумовых параметров. Достаточно найти совокупность величин  $G_{\text{шд}}$ ,  $X_{\text{кор}}$ ,  $F_{\text{и мин}}$  и  $R_{1\text{мин}}$ , воспользовавшись для этого методом определения шумовых параметров по экстремальным величинам.

Зависимость избыточного коэффициента шума от вещественной и мнимой составляющих источника сигнала, очевидная из (4.74), позволяет варьировать ими в определенных пределах без ухудшения отношения сигнал/шум. Как следует из (4.123), это возможно в том случае, если выполняется условие

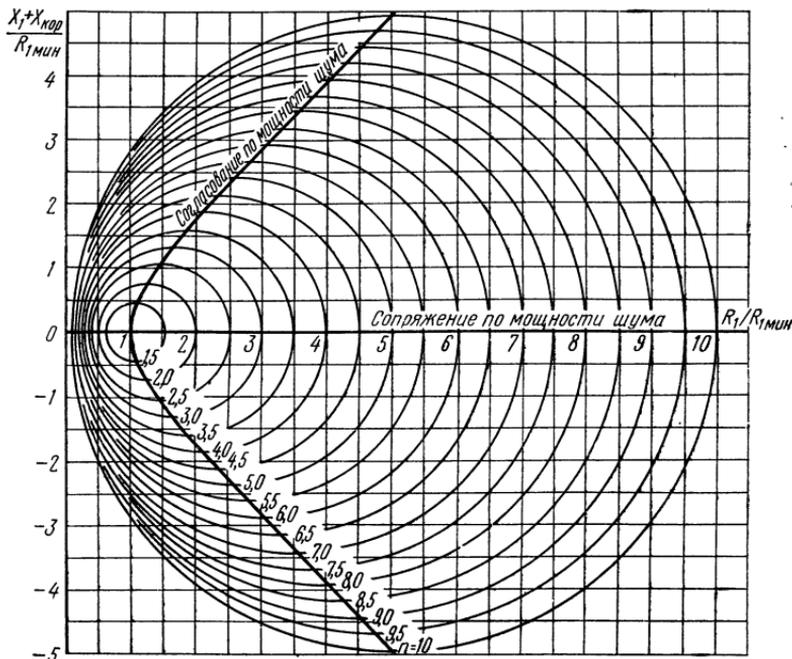


Рис. 4.13. Условия неизменного коэффициента шума для различных соотношений  $R_1/R_{1\text{ мин}}$

$$\frac{R_{1\text{мин}}}{R_1} \left[ \left( \frac{R_1}{R_{1\text{мин}}} \right)^2 + \left( \frac{X_1 + X_{\text{кор}}}{R_{1\text{мин}}} \right)^2 + 1 \right] = \text{const}, \quad (4.126)$$

при котором шумозащищенность сигнала при варьировании сопротивлением источника сигнала не изменяется, поэтому назовем его *условием неизменного коэффициента шума*.

При взаимной компенсации реактивных составляющих сопротивления источника сигнала и корреляционного сопротивления шума условие неизменного коэффициента шума принимает вид

$$\frac{R_{1\text{мин}}}{R_1} \left[ \left( \frac{R_1}{R_{1\text{мин}}} \right)^2 + 1 \right] = \frac{1}{n} + n = \text{const}. \quad (4.127)$$

При  $n=1$  это условие вырождается в число 2, выражение (4.123) обращается в нуль, окружность (4.124) в точку, что соответствует минимальному значению избыточного коэффициента шума.

Весьма полезным для определения допустимых пределов варьирования могут оказаться графические построения рис. 4.13, представляющие окружности неизменного коэффициента шума для различных соотношений  $R_1/R_{1\text{мин}}=n$ . В случае включения на входе системы передачи дополнительного реактивного двухполюсника по вертикальной оси соответственно откладывается  $y = (X_1 + X_d + X_{\text{кор}})/R_{1\text{мин}}$ .

## СОЕДИНЕНИЯ ШУМЯЩИХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

### 5.1. СЛОЖНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

**Ф**ункциональные электрические цепи, за немногим исключением, представляют собой сложные соединения, содержащие активные и пассивные элементы. Поэтому в сложных структурах почти всегда можно выявить определенным образом соединенные четырехполюсники.

Прием дробления сложной электрической цепи на отдельные четырехполюсники получил название метода многополюсных подсхем. Он оказывается чрезвычайно эффективным при анализе электрических схем, особенно если заранее известны (заготовлены) типовые соединения четырехполюсников и имеются формулы для расчета их результирующих параметров [35, 38, 67, 75, 86, 122].

Рассмотрим основные виды сложных соединений, исходя из предположения, что количество входящих в них четырехполюсников может быть любым целым числом, равным  $\mu$ . Все они, допустим, содержат в общем случае коррелированные источники шума и характеризуются первичными шумовыми параметрами:  $R_{шн}^{(s)}, G_{ш а}^{(s)}, Z_{кор}^{(s)}$  или  $R_{ш а}^{(s)}, G_{шн}^{(s)}, Y_{кор}^{(s)}$  ( $s=1, 2, 3, \dots, \mu$ ).

Из теории электрических цепей известны пять основных видов сложных соединений четырехполюсников: последовательное, параллельное, последовательно-параллельное, параллельно-последовательное и ступенчатое [6, 35].

Сложное соединение по отношению к источнику сигнала и нагрузке (или другим внешним цепям) представляет один результирующий шумящий четырехполюсник (рис. 5.1). Свойства его выражаются сигнальной  $c^{(p)}$  и шумовой  $r^{(p)}$  матрицами, которые содержат в себе соответственно сигнальные и шумовые матрицы всех четырехполюсников сложного соединения.

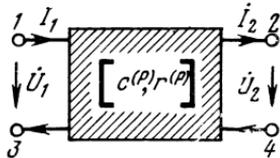


Рис. 5.1. Результирующий шумящий четырехполюсник

## 5.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Последовательное соединение шумящих четырехполюсников, характеризуемых  $z^{(1)}, \dots, z^{(s)}, \dots, z^{(\mu)}$  - сигнальными и  $r_z^{(1)}, \dots, r_z^{(s)}, \dots, r_z^{(\mu)}$  - шумовыми матрицами, представлено на рис. 5.2а, а результирующий его четырехполюсник с показателями  $z^{(p)}$  и  $r_z^{(p)}$  — на рис. 5.2б.

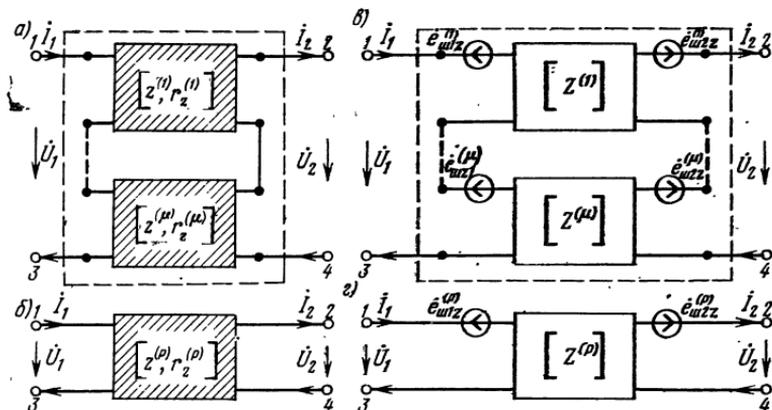


Рис. 5.2. Последовательное соединение шумящих четырехполюсников:

а) общий вид, б) результирующий четырехполюсник, в) источники шума вынесены ко входу и выводу, г) результирующий четырехполюсник с вынесенными шумовыми источниками

Пользуясь известным приемом дробления линейной цепи, представим последовательное соединение состоящим из бесшумных четырехполюсников  $z^{(1)}, \dots, z^{(s)}, \dots, z^{(\mu)}$  с вынесенными источниками шумовых напряжений  $\dot{e}_{шz1}^{(1)}, \dots, \dot{e}_{шz1}^{(s)}, \dots, \dot{e}_{шz1}^{(\mu)}$  и  $\dot{e}_{шz2}^{(1)}, \dots, \dot{e}_{шz2}^{(s)}, \dots, \dot{e}_{шz2}^{(\mu)}$  (рис. 5.2в) и результирующий четырехполюсник — соответственно из  $z^{(p)}$  и  $e_{шz}^{(p)}$ ,  $e_{шz}^{(p)}$  (рис. 5.2г).

Результирующая сигнальная матрица  $\mu$  последовательно соединенных четырехполюсников

$$z^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} z^{(s)}, \quad (5.1)$$

отсюда результирующие сигнальные параметры:

$$z_{11}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} z_{11}^{(s)}, \quad z_{12}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} z_{12}^{(s)}, \quad z_{21}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} z_{21}^{(s)}, \quad z_{22}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} z_{22}^{(s)}. \quad (5.2)$$

Результирующая шумовая матрица последовательно-го соединения

$$r_z^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} r_z^{(s)} \quad (5.3)$$

содержит результирующие шумовые напряжения:

$$\dot{e}_{\text{ш } z1}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} \dot{e}_{\text{ш } z1}^{(s)} \quad \text{и} \quad \dot{e}_{\text{ш } z2}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} \dot{e}_{\text{ш } z2}^{(s)}. \quad (5.4)$$

При последовательном соединении шумовые токи во входных и выходных цепях каждого из четырехполюсников равны соответствующим результирующим токам:

$$i_{\text{ш } 1}^{(p)} = i_{\text{ш } 1}^{(s)}, \quad i_{\text{ш } 2}^{(p)} = i_{\text{ш } 2}^{(s)} \quad (s = 1, 2, 3, \dots, \mu). \quad (5.5)$$

Напряжения на выводах  $s$ -го шумящего четырехполюсника определяются соотношениями:

$$\dot{U}_1^{(s)} = z^{(s)} z^{- (1)} (\dot{U}_1^{(p)} - \dot{e}_{\text{ш } z1}^{(p)} + \dot{e}_{\text{ш } z1}^{(s)}), \quad (5.6)$$

$$\dot{U}_2^{(s)} = z^{(s)} z^{- (1)} (\dot{U}_2^{(p)} - \dot{e}_{\text{ш } z2}^{(p)} + \dot{e}_{\text{ш } z2}^{(s)}) \quad (5.7)$$

и в соединении без учета источников шума:  $\dot{U}_1^{(s)} = z^{(s)} z^{- (1)} \dot{U}_1^{(p)}$ ,  $\dot{U}_2^{(s)} = z^{(s)} z^{- (1)} \dot{U}_2^{(p)}$ .

Для определения результирующих шумовых параметров воспользуемся формулами табл. 4.1:

$$\dot{e}_{\text{ш } a}^{(p)} = \dot{e}_{\text{ш } z1}^{(p)} - \frac{z_{11}^{(p)}}{z_{21}^{(p)}} \dot{e}_{\text{ш } z2}^{(p)}, \quad (5.8)$$

$$i_{\text{ш } a}^{(p)} = \frac{1}{z_{21}^{(p)}} \dot{e}_{\text{ш } z2}^{(p)}. \quad (5.9)$$

Используя (5.9) и принимая согласно (2.2)  $|i_{\text{ш } a}^{(s)}|^2 = 4kT \Delta f G_{\text{ш } a}^{(s)}$ ,  $|i_{\text{ш } a}^{(p)}|^2 = 4kT \Delta f G_{\text{ш } a}^{(p)}$ , после ряда подстановок и преобразований определим результирующую шумовую проводимость

$$G_{\text{ш } a}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш } a}^{(s)} |z_{21}^{(s)}|^2 \left| \sum_{s=1}^{\mu} z_{21}^{(s)} \right|^{-2}. \quad (5.10)$$

Результирующее корреляционное сопротивление шума находим, используя (5.8) — (5.10), после соответствующих преобразований и подстановок в (4.34) определим

$$Z_{\text{кор}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} z_{11}^{(s)} + \sum_{s=1}^{\mu} z_{21}^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш}a}^{(s)} z_{21}^{(s)*} (Z_{\text{кор}}^{(s)} - z_{11}^{(s)}) \times \\ \times \left( \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш}a}^{(s)} |z_{21}^{(s)}|^2 \right)^{-1}. \quad (5.11)$$

Аналогичным образом, на основе (5.10) и (5.11), учитывая  $\overline{|e_{\text{шн}}^{(p)}|^2} = 4kT \Delta f R_{\text{шн}}^{(p)}$ , где  $\overline{|e_{\text{шн}}^{(p)}|^2} = \overline{|e_{\text{ш}a}^{(p)}|^2} - |Z_{\text{кор}}^{(p)}|^2 \overline{|i_{\text{ш}a}^{(p)}|^2}$ , получим результирующее шумовое сопротивление

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} (R_{\text{шн}}^{(s)} + G_{\text{ш}a}^{(s)} |Z_{\text{кор}}^{(s)} - z_{11}^{(s)}|^2) - \\ - \left| \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш}a}^{(s)} z_{21}^{(s)*} (Z_{\text{кор}}^{(s)} - z_{11}^{(s)}) \right|^2 \left( \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш}a}^{(s)} |z_{21}^{(s)}|^2 \right)^{-1}. \quad (5.12)$$

*Частный случай.* Соединение идентичных шумящих четырехполосников.

При последовательном соединении идентичных шумящих четырехполосников, характеризуемых сигнальными параметрами равной величины  $z_{11} = z_{11}^{(s)}$ ,  $z_{12} = z_{12}^{(s)}$ ,  $z_{21} = z_{21}^{(s)}$ ,  $z_{22} = z_{22}^{(s)}$  и шумовыми напряжениями  $\dot{e}_{\text{ш}z1} = \dot{e}_{\text{ш}z1}^{(s)}$ ,  $\dot{e}_{\text{ш}z2} = \dot{e}_{\text{ш}z2}^{(s)}$ , результирующие сигнальные параметры согласно (5.2)

$$z_{11}^{(p)} = \mu z_{11}, \quad z_{12}^{(p)} = \mu z_{12}, \quad z_{21}^{(p)} = \mu z_{21}, \quad z_{22}^{(p)} = \mu z_{22} \quad (5.13)$$

и результирующие шумовые напряжения из (5.4)

$$\dot{e}_{\text{ш}z1}^{(p)} = \mu \dot{e}_{\text{ш}z1}, \quad \dot{e}_{\text{ш}z2}^{(p)} = \mu \dot{e}_{\text{ш}z2}. \quad (5.14)$$

В соответствии с этим получим результирующие матрицы последовательного соединения идентичных шумящих четырехполосников  $z^{(p)} = \mu z$ ,  $r_z^{(p)} = \mu r_z$  и определим согласно (5.10)–(5.12) первичные шумовые параметры:

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = \mu R_{\text{шн}}, \quad G_{\text{ш}a}^{(p)} = \mu^{-1} G_{\text{ш}a}, \quad Z_{\text{кор}}^{(p)} = \mu Z_{\text{кор}}, \quad (5.15)$$

где  $R_{\text{шн}}$ ,  $G_{\text{ш}a}$  и  $Z_{\text{кор}}$  — шумовые параметры любого из идентичных четырехполосников.

### 5.3. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Параллельное соединение шумящих четырехполосников представлено на рис. 5.3а и результирующий четырехполосник — на рис. 5.3б. Образующие соединения элементы характеризуются сигнальными  $y^{(1)}$ , ...,  $y^{(s)}$ , ...

...,  $y^{(\mu)}$  и  $r_{y^{(1)}}$ , ...,  $r_{y^{(s)}}$ , ...,  $r_{y^{(\mu)}}$  — шумовыми матрицами, а результирующий четырехполюсник —  $y^{(p)}$  и  $r_{y^{(p)}}$ .

Подобно предыдущему представим параллельное соединение состоящим из бесшумных четырехполюсников  $y^{(1)}$ , ...,  $y^{(s)}$ , ...,  $y^{(\mu)}$  с вынесенными источниками шумовых токов  $i_{ш y1}^{(1)}, \dots, i_{ш y1}^{(s)}, \dots, i_{ш y1}^{(\mu)}$  и  $i_{ш y2}^{(1)}, \dots, i_{ш y2}^{(s)}, \dots, i_{ш y2}^{(\mu)}$  (рис. 5.3в) и результирующий четырехполюсник — соответственно из  $y^{(p)}$  и  $r_{y^{(p)}}$ ,  $i_{ш y1}^{(p)}$ ,  $i_{ш y2}^{(p)}$  (рис. 5.3г).

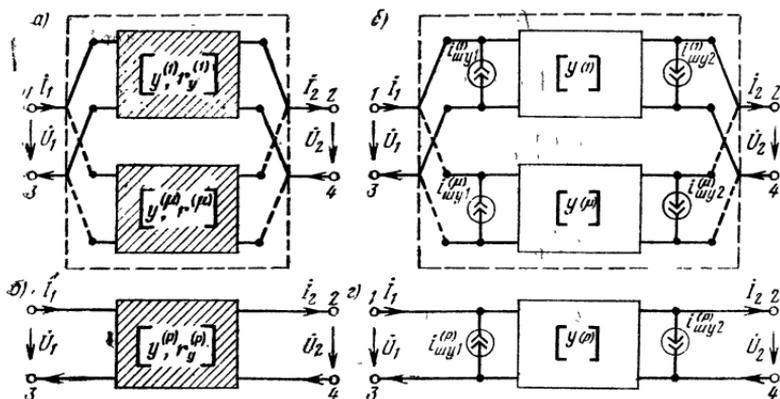


Рис. 5.3. Параллельное соединение  $\mu$  шумящих четырехполюсников:

а) общий вид, б) результирующий четырехполюсник, в) источники шума вынесены ко входу и выходу, г) результирующий четырехполюсник с вынесенными шумовыми источниками

Результирующая сигнальная матрица  $\mu$  параллельно соединенных четырехполюсников

$$y^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} y^{(s)}, \quad (5.16)$$

отсюда результирующие сигнальные параметры

$$y_{11}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} y_{11}^{(s)}, \quad y_{12}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} y_{12}^{(s)}, \quad y_{21}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} y_{21}^{(s)}, \quad y_{22}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} y_{22}^{(s)}. \quad (5.17)$$

Результирующая шумовая матрица параллельного соединения

$$r_{y^{(p)}} = \sum_{s=1}^{\mu} r_{y^{(s)}} \quad (5.18)$$

образуется результирующими шумовыми токами:

$$i_{ш y1}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} i_{ш y1}^{(s)}, \quad (5.19)$$

$$i_{ш y2}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} i_{ш y2}^{(s)}. \quad (5.20)$$

При параллельном соединении шумовые напряжения на входе и выходе каждого из четырехполюсников равны соответствующим результирующим напряжениям:

$$\dot{U}_{ш1}^{(p)} = \dot{U}_{ш1}^{(s)}; \dot{U}_{ш2}^{(p)} = \dot{U}_{ш2}^{(s)} \quad (s = 1, 2, 3, \dots, \mu). \quad (5.21)$$

Токи на входе и выходе  $s$ -го шумящего четырехполюсника выражаются через аналогичные результирующие величины всего соединения:

$$i_1^{(s)} = y^{(s)} y^{(-1)} (i_1^{(p)} - i_{ш y1}^{(p)} + i_{ш y1}^{(s)}), \quad (5.22)$$

$$i_2^{(s)} = y^{(s)} y^{-(1)} (i_2^{(p)} - i_{ш y2}^{(p)} + i_{ш y2}^{(s)}), \quad (5.23)$$

а в соединении без учета источников шума  $i_1^{(s)} = y^{(s)} y^{-(1)} i_1^{(p)}$ ,  $i_2^{(s)} = y^{(s)} y^{-(1)} i_2^{(p)}$ .

Для определения шумовых параметров воспользуемся соотношениями табл. 4.1:

$$\dot{e}_{ш a}^{(p)} = -\frac{1}{y_{21}^{(p)}} i_{ш y2}^{(p)}, \quad (5.24)$$

$$i_{ш a}^{(p)} = i_{ш y1}^{(p)} - \frac{y_{11}^{(p)}}{y_{21}^{(p)}} i_{ш y2}^{(p)}. \quad (5.25)$$

После некоторых преобразований (5.24) и соответствующих подстановок, полагая согласно (2.1)  $|\overline{e_{ш a}^{(p)}}|^2 = 4kT \Delta f R_{ш a}^{(p)}$  и  $|\overline{e_{ш a}^{(s)}}|^2 = 4kT \Delta f R_{ш a}^{(s)}$ , получим результирующее шумовое сопротивление

$$R_{ш a}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} R_{ш a}^{(s)} |y_{21}^{(s)}|^2 \sum_{s=1}^{\mu} |y_{21}^{(s)}|^{-2} \quad (5.26)$$

Используя (5.24) — (5.26) и (4.49), после подстановок и промежуточных выкладок найдем результирующую корреляционную проводимость

$$Y_{\text{кор}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} y_{11}^{(s)} + \sum_{s=1}^{\mu} y_{21}^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ша}a}^{(s)} y_{21}^{(s)*} (Y_{\text{кор}}^{(s)} - y_{11}^{(s)}) \times \\ \times \left( \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ша}a}^{(s)} |y_{21}^{(s)}|^2 \right)^{-1}. \quad (5.27)$$

Затем, используя (5.26), (5.27) и учитывая

$$\overline{|i_{\text{шн}}^{(p)}|^2} = 4kT \Delta f G_{\text{шн}}^{(p)}, \quad \overline{|i_{\text{шн}}^{(p)}|^2} = \overline{|i_{\text{ша}a}^{(p)}|^2} - |Y_{\text{кор}}^{(p)}|^2 \overline{|e_{\text{ша}a}^{(p)}|^2},$$

определим результирующую шумовую проводимость

$$G_{\text{шн}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} (G_{\text{шн}}^{(s)} + R_{\text{ша}a}^{(s)} |Y_{\text{кор}}^{(s)} - y_{11}^{(s)}|^2) - \left| \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ша}a}^{(s)} y_{21}^{(s)*} \times \right. \\ \left. \times (Y_{\text{кор}}^{(s)} - y_{11}^{(s)}) \right|^2 \left( \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ша}a}^{(s)} |y_{21}^{(s)}|^2 \right)^{-1}. \quad (5.28)$$

*Частный случай.* Соединение идентичных шумящих четырехполюсников.

При параллельном соединении идентичных шумящих четырехполюсников, одноименные сигнальные параметры которых соответственно равны  $y_{11}^{(s)} = y_{11}$ ,  $y_{12}^{(s)} = y_{12}$ ,  $y_{21}^{(s)} = y_{21}$ ,  $y_{22}^{(s)} = y_{22}$ , имеющих равные шумовые токи  $i_{\text{ш}y1}^{(s)} = i_{\text{ш}y1}$  и  $i_{\text{ш}y2}^{(s)} = i_{\text{ш}y2}$ , результирующие сигнальные параметры в соответствии с (5.17) равны:

$$y_{11}^{(p)} = \mu y_{11}, \quad y_{12}^{(p)} = \mu y_{12}, \quad y_{21}^{(p)} = \mu y_{21}, \quad y_{22}^{(p)} = \mu y_{22}. \quad (5.29)$$

и результирующие шумовые токи согласно (5.19) и (5.20):

$$i_{\text{ш}y1}^{(p)} = \mu i_{\text{ш}y1}, \quad i_{\text{ш}y2}^{(p)} = \mu i_{\text{ш}y2}. \quad (5.30)$$

Используя (5.16) и (5.18), получим результирующие матрицы параллельного соединения  $\mu$  идентичных шумящих четырехполюсников  $y^{(p)} = \mu y$ ,  $r_y^{(p)} = \mu r_y$  и по (5.26)–(5.28) определим первичные шумовые параметры:

$$G_{\text{шн}}^{(p)} = \mu G_{\text{шн}}, \quad R_{\text{ша}a}^{(p)} = \mu^{-1} R_{\text{ша}a}, \quad Y_{\text{кор}}^{(p)} = \mu^{-1} Y_{\text{кор}}, \quad (5.31)$$

где  $G_{\text{шн}}$ ,  $R_{\text{ша}a}$  и  $Y_{\text{кор}}$  — шумовые параметры любого из идентичных четырехполюсников.

#### 5.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Последовательно-параллельное соединение шумящих четырехполюсников представлено на рис. 5.4а и результирующий четырехполюсник — на рис. 5.4б. Образующие его четырехполюсники характеризуются сигнальными  $h^{(1)}, \dots, h^{(s)}, \dots, h^{(\mu)}$  и  $r_h^{(1)}, \dots, r_h^{(s)}, \dots, r_h^{(\mu)}$ -шумовыми матрицами, а результирующий — соответственно  $h^{(p)}$  и  $r^{(p)}_h$ .

Представим рассматриваемую цепь в виде соединения бесшумных четырехполосников  $h^{(1)}, \dots, h^{(s)}, \dots, h^{(\mu)}$  и вынесенных шумовых источников  $e_{шh}^{(1)}, \dots, e_{шh}^{(s)}, \dots, e_{шh}^{(\mu)}$  и  $i_{шh}^{(1)}, \dots, i_{шh}^{(s)}, \dots, i_{шh}^{(\mu)}$  (рис. 5.4а) и результирующий четырехполосник —  $h^{(p)}$  и  $e_{шh}^{(p)}, i_{шh}^{(p)}$  (рис. 5.4г).

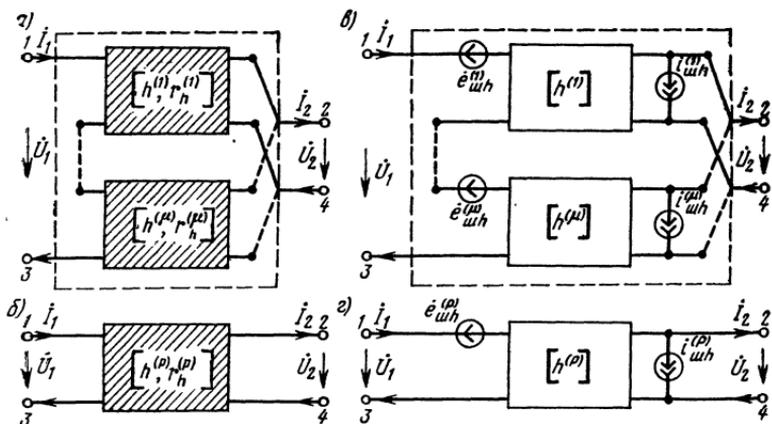


Рис. 5.4. Последовательно-параллельное соединение шумящих четырехполосников:  
 а) общий вид, б) результирующий четырехполосник, в) источники шума вынесены ко входу и выходу, г) результирующий четырехполосник с вынесенными шумовыми источниками

Сигнальные свойства последовательно-параллельного соединения  $\mu$  шумящих четырехполосников описываются матрицей

$$h^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} h^{(s)}, \quad (5.32)$$

отсюда результирующие сигнальные параметры:

$$h_{11}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} h_{11}^{(s)}, \quad h_{12}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} h_{12}^{(s)}, \quad h_{21}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} h_{21}^{(s)}, \quad h_{22}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} h_{22}^{(s)}. \quad (5.33)$$

Шумовые свойства последовательно-параллельного соединения выражаются результирующей матрицей

$$r_h^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} r_h^{(s)}, \quad (5.34)$$

согласно которой находим шумовые напряжение и ток:

$$\dot{e}_{\text{ш}h}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} \dot{e}_{\text{ш}h}^{(s)}, \quad (5.35)$$

$$i_{\text{ш}h}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} i_{\text{ш}h}^{(s)}. \quad (5.36)$$

Шумовые напряжения слева и токи справа у всех четырехполюсников соответственно равны:

$$\dot{U}_{\text{ш}1}^{(p)} = \dot{U}_{\text{ш}1}^{(s)} \quad (5.37)$$

$$I_{\text{ш}2}^{(p)} = I_{\text{ш}2}^{(s)} \quad (s = 1, 2, 3, \dots, \mu), \quad (5.38)$$

Напряжения и токи между внешними выводами  $s$ -го четырехполюсника связаны с результирующими величинами следующим образом:

$$\dot{U}_1^{(s)} = h^{(s)} h^{-1} (\dot{U}_1^{(p)} - e_{\text{ш}h}^{(p)} + e_{\text{ш}h}^{(s)}), \quad (5.39)$$

$$i_2^{(s)} = h^{(s)} h^{-1} (i_2^{(p)} - i_{\text{ш}h}^{(p)} + i_{\text{ш}h}^{(s)}) \quad (5.40)$$

и если не учитываются шумовые источники

$$\dot{U}_1^{(s)} = h^{(s)} h^{-1} \dot{U}_1^{(p)}, \quad i_2^{(s)} = h^{(s)} h^{-1} i_2^{(p)}.$$

Для определения результирующих шумовых параметров воспользуемся соотношениями из табл. 4.1:

$$\dot{e}_{\text{ш}a}^{(p)} = \dot{e}_{\text{ш}h}^{(s)} - \frac{h_{11}^{(p)}}{h_{21}^{(p)}} i_{\text{ш}h}^{(p)}, \quad (5.41)$$

$$i_{\text{ш}a}^{(p)} = - \frac{1}{h_{21}^{(p)}} i_{\text{ш}h}^{(p)}. \quad (5.42)$$

На основании (5.42), после соответствующих преобразований и подстановок определим результирующую шумовую проводимость

$$G_{\text{ш}a}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш}a}^{(s)} |h_{21}^{(s)}|^2 \left| \sum_{s=1}^{\mu} h_{21}^{(s)} \right|^{-2} \quad (5.43)$$

Используя (5.41) — (5.43) и (4.34), после соответствующих подстановок и преобразований найдем результирующее корреляционное сопротивление шума

$$Z_{\text{кор}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} h_{11}^{(s)} + \sum_{s=1}^{\mu} h_{21}^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш}a}^{(s)} h_{21}^{(s)*} (Z_{\text{кор}}^{(s)} - h_{11}^{(s)}) \times \\ \times \left( \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш}a}^{(s)} |h_{21}^{(s)}|^2 \right)^{-1}. \quad (5.44)$$

Затем на основании (5.43) и (5.44), опуская промежуточные выкладки, определим результирующее шумовое сопротивление

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} (R_{\text{шн}}^{(s)} + G_{\text{ш а}}^{(s)} |Z_{\text{кор}}^{(s)} - h_{11}^{(s)}|^2) - \left| \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш а}}^{(s)} h_{21}^{(s)*} \right| \times \\ \times (Z_{\text{кор}}^{(s)} - h_{11}^{(s)}) \left| \left( \sum_{s=1}^{\mu} G_{\text{ш а}}^{(s)} |h_{21}^{(s)}|^2 \right)^{-1} \right|. \quad (5.45)$$

*Частный случай.* Соединение идентичных шумящих четырехполюсников.

При последовательно-параллельном соединении идентичных шумящих четырехполюсников, одноименные сигнальные параметры которых равны  $h_{11}^{(s)} = h_{11}$ ,  $h_{12}^{(s)} = h_{12}$ ,  $h_{21}^{(s)} = h_{21}$ ,  $h_{22}^{(s)} = h_{22}$ , как и одноименные шумовые величины  $\dot{e}_{\text{шн}}^{(s)} = \dot{e}_{\text{шн}}$ ,  $\dot{i}_{\text{шн}}^{(s)} = \dot{i}_{\text{шн}}$ , результирующие сигнальные параметры согласно (5.33) принимают значения:

$$h_{11}^{(s)} = \mu h_{11}, \quad h_{12}^{(s)} = \mu h_{12}, \quad h_{21}^{(s)} = \mu h_{21}, \quad h_{22}^{(s)} = \mu h_{22}, \quad (5.46)$$

а результирующие шумовые величины в соответствии с (5.35) и (5.36):

$$\dot{e}_{\text{шн}}^{(p)} = \mu \dot{e}_{\text{шн}}, \quad \dot{i}_{\text{шн}}^{(p)} = \mu \dot{i}_{\text{шн}}. \quad (5.47)$$

Из (5.32), (5.34) получим результирующие сигнальную и шумовую матрицы  $h^{(p)} = \mu h$ ,  $r_h^{(p)} = \mu r_h$  и по (5.43)–(5.45) найдем первичные шумовые параметры:

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = \mu R_{\text{шн}}, \quad G_{\text{ш а}}^{(p)} = \mu^{-1} G_{\text{ш а}}, \quad Z_{\text{кор}}^{(p)} = \mu Z_{\text{кор}}, \quad (5.48)$$

где  $R_{\text{шн}}$ ,  $G_{\text{ш а}}$  и  $Z_{\text{кор}}$  — шумовые параметры любого из идентичных четырехполюсников.

## 5.5. ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Параллельно-последовательное соединение шумящих четырехполюсников представлено на рис. 5.5а и результирующий четырехполюсник — на рис. 5.5б. Входящие в него элементы характеризуются сигнальными  $f^{(1)}, \dots, f^{(s)}, \dots, f^{(\mu)}$  и  $r_f^{(1)}, \dots, r_f^{(s)}, \dots, r_f^{(\mu)}$ -шумовыми матрицами и соответственно результирующими —  $f^{(p)}$  и  $r^{(p)}$ .

Представим рассматриваемую цепь состоящей из бесшумных четырехполюсников  $f^{(1)}, \dots, f^{(s)}, \dots, f^{(\mu)}$  и вынесенных шумовых источников  $\dot{i}_{\text{ш } f}^{(1)}, \dots, \dot{i}_{\text{ш } f}^{(s)}, \dots, \dot{i}_{\text{ш } f}^{(\mu)}$  и  $\dot{e}_{\text{ш } f}^{(1)}, \dots, \dot{e}_{\text{ш } f}^{(s)}, \dots, \dot{e}_{\text{ш } f}^{(\mu)}$  (рис. 5.5в), а результирующий четырехполюсник соответственно из  $f^{(p)}$ ,  $\dot{i}_{\text{ш } f}^{(p)}$  и  $\dot{e}_{\text{ш } f}^{(p)}$  (рис. 5.5г).

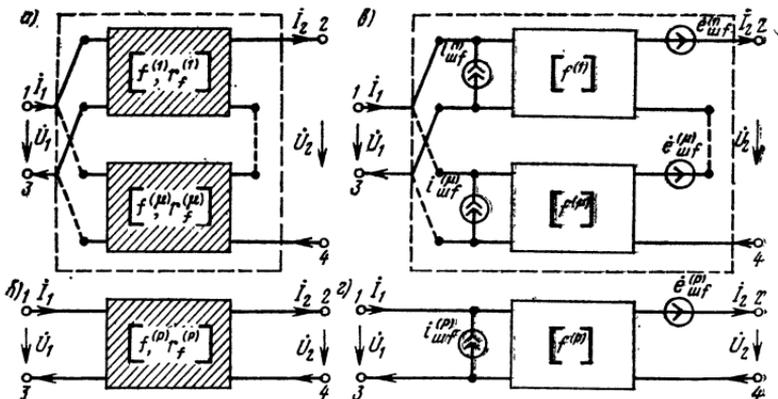


Рис. 5.5. Параллельно-последовательное соединение  $\mu$  шумящих четырехполюсников:  
 а) общий вид, б) результирующий четырехполюсник, в) источники шума вынесены ко входу и выходу, г) результирующий четырехполюсник с вынесенными шумовыми источниками

Сигнальные свойства параллельно-последовательного соединения  $\mu$  шумящих четырехполюсников выражаются результирующей матрицей

$$f^{(s)} = \sum_{s=1}^{\mu} f^{(s)}, \quad (5.49)$$

отсюда результирующие сигнальные параметры:

$$f_{11}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} f_{11}^{(s)}, \quad f_{12}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} f_{12}^{(s)}, \quad f_{21}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} f_{21}^{(s)}, \quad f_{22}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} f_{22}^{(s)}. \quad (5.50)$$

Шумовые свойства соединения описываются результирующей матрицей

$$r_f^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} r_f^{(s)}, \quad (5.51)$$

образуемой результирующими шумовыми токами и напряжением:

$$i_{mf}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} i_{mf}^{(s)}, \quad (5.52)$$

$$e_{mf}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} e_{mf}^{(s)}. \quad (5.53)$$

Шумовые токи слева и напряжения справа у каждого из четырехполюсников равны

$$\dot{U}_{\text{ш}1}^{(p)} = \dot{U}_{\text{ш}1}^{(s)}, \quad i_{\text{ш}2}^{(p)} = i_{\text{ш}2}^{(s)} \quad (s = 1, 2, 3, \dots, \mu). \quad (5.54)$$

Токи и напряжения между внешними выводами  $s$ -го четырехполюсника связаны с одноименными результирующими величинами следующим образом:

$$i_1^{(s)} = f^{(s)} f^{-1} (i_1^{(p)} - i_{\text{ш}f}^{(p)} + i_{\text{ш}f}^{(s)}), \quad (5.55)$$

$$\dot{U}_2^{(s)} = f^{(s)} f^{-1} (\dot{U}_2^{(p)} - \dot{e}_{\text{ш}f}^{(p)} + \dot{e}_{\text{ш}f}^{(s)}), \quad (5.56)$$

а без учета источников шума

$$i_1^{(s)} = f^{(s)} f^{-1} i_1^{(p)}, \quad \dot{U}_2^{(s)} = f^{(s)} f^{-1} \dot{U}_2^{(p)}.$$

Для определения результирующих шумовых параметров воспользуемся соотношениями из табл. 4.1:

$$\dot{e}_{\text{ш}a}^{(p)} = \frac{1}{f_{21}^{(p)}} \dot{e}_{\text{ш}f}^{(p)}, \quad (5.57)$$

$$i_{\text{ш}a}^{(p)} = - \frac{f_{11}^{(p)}}{f_{21}^{(p)}} \dot{e}_{\text{ш}f}^{(p)} + i_{\text{ш}f}^{(p)}. \quad (5.58)$$

На основании (5.57), после промежуточных преобразований и подстановок найдем результирующее шумовое сопротивление

$$R_{\text{ш}a}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ш}a}^{(s)} |f_{21}^{(s)}|^2 \left| \sum_{s=1}^{\mu} f_{21}^{(s)} \right|^{-2}. \quad (5.59)$$

Используя (5.57)–(5.59) и (4.49), опуская промежуточные преобразования и подстановки, определим результирующую корреляционную проводимость

$$Y_{\text{коп}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} f_{11}^{(s)} + \sum_{s=1}^{\mu} f_{21}^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ш}a}^{(s)} f_{21}^{(s)*} (Y_{\text{коп}}^{(s)} - f_{11}^{(s)}) \times \\ \times \left( \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ш}a}^{(s)} |f_{21}^{(s)}|^2 \right)^{-1}. \quad (5.60)$$

Затем, воспользовавшись (5.59)–(5.60), найдем результирующую шумовую проводимость

$$G_{\text{шн}}^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} (G_{\text{шн}}^{(s)} + R_{\text{ш}a}^{(s)} |Y_{\text{коп}}^{(s)} - f_{11}^{(s)}|^2) - \\ - \left| \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ш}a}^{(s)} f_{21}^{(s)*} (Y_{\text{коп}}^{(s)} - f_{11}^{(s)}) \right|^2 \left( \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ш}a}^{(s)} |f_{21}^{(s)}|^2 \right)^{-1}. \quad (5.61)$$

*Частный случай.* Соединение идентичных шумящих четырехполюсников.

При параллельно-последовательном соединении идентичных шумящих четырехполюсников, имеющих одноименные сигнальные параметры  $f_{11}^{(s)} = f_{11}, f_{12}^{(s)} = f_{12}, f_{21}^{(s)} = f_{21}, f_{22}^{(s)} = f_{22}$  и равные одноименные источники шума  $i_{шf}^{(s)} = i_{шf}, \dot{e}_{шf}^{(s)} = \dot{e}_{шf}$ , результирующие сигнальные параметры согласно (5.50):

$$f_{11}^{(s)} = \mu f_{11}, f_{12}^{(s)} = \mu f_{12}, f_{21}^{(s)} = \mu f_{21}, f_{22}^{(s)} = \mu f_{22} \quad (5.62)$$

и результирующие шумовые ток и напряжение, определяемые по (5.52 и 5.53):

$$i_{шf}^{(p)} = \mu i_{шf}, \dot{e}_{шf}^{(p)} = \mu \dot{e}_{шf}. \quad (5.63)$$

На основании (5.49) и (5.51) получим результирующие сигнальную и шумовую матрицы  $f^{(p)} = \mu f, r_f^{(p)} = \mu r_f$  и из (5.59) — (5.61) найдем первичные шумовые параметры:

$$G_{шн}^{(p)} = \mu G_{шн}, R_{шa}^{(p)} = \mu^{-1} R_{шa}, Y_{кор}^{(p)} = \mu Y_{кор}, \quad (5.64)$$

где  $G_{шн}, R_{шa}$  и  $Y_{кор}$  — первичные шумовые параметры любого из идентичных четырехполюсников.

## 5.6. СТУПЕНЧАТОЕ (КАСКАДНОЕ) СОЕДИНЕНИЕ

Ступенчатое соединение шумящих четырехполюсников представлено на рис. 5.6а и результирующий четырехполюсник — на рис. 5.6б. Образующие соединения, шумящие четырехполюсники охарактеризуем сигнальными  $a^{(1)}, \dots, a^{(s)}, \dots, a^{(\mu)}$  и  $r_a^{(1)}, \dots, r_a^{(s)}, \dots, r_a^{(\mu)}$  — шу-

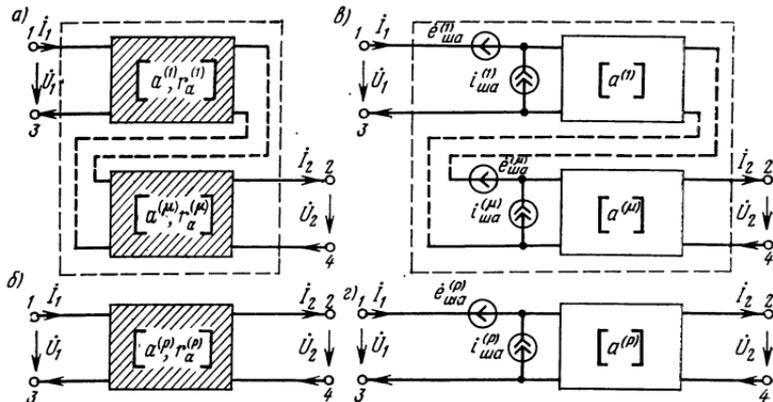


Рис. 5.6. Ступенчатое соединение  $\mu$  шумящих четырехполюсников:

а) общий вид, б) результирующий четырехполюсник, в) источники шума вынесены ко входу, г) результирующий четырехполюсник с вынесенными шумовыми источниками

мовыми матрицами, а результирующий — соответственно  $a^{(p)}$  и  $r_a^{(p)}$ .

Представим рассматриваемую цепь состоящей из бесшумных четырехполюсников:  $a^{(1)}, \dots, a^{(s)}, \dots, a^{(\mu)}$  и вынесенных источников шума  $\dot{e}_{ш a}^{(1)}, \dot{i}_{ш a}^{(1)}, \dots, \dot{e}_{ш a}^{(s)}, \dot{i}_{ш a}^{(s)}, \dots, \dot{e}_{ш a}^{(\mu)}, \dot{i}_{ш a}^{(\mu)}$  (рис. 5.6в) и соответственно результирующий (рис. 5.6г) из  $a^{(p)}$  и  $e_{ш a}^{(p)}, i_{ш a}^{(p)}$ .

Сигнальные свойства ступенчатого соединения  $\mu$  шумящих четырехполюсников выражаются результирующей матрицей

$$a^{(p)} = \prod_{s=1}^{\mu} a^{(s)}, \quad (5.65)$$

а шумовые — результирующей шумовой матрицей

$$r_a^{(p)} = r_a^{(1)} + a^{(1)} r_a^{(2)} + \dots + \prod_{n=1}^{s-1} a^{(n)} r_a^{(s)} + \dots + \\ + \prod_{m=1}^{\mu-1} a^{(m)} r_a^{(\mu)}, \quad (5.66)$$

где

$$\prod_{n=1}^{s-1} a^{(n)} = a^{(s-1)(p)} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(s-1)(p)} & a_{12}^{(s-1)(p)} \\ a_{21}^{(s-1)(p)} & a_{22}^{(s-1)(p)} \end{bmatrix}, \quad (5.67)$$

$$\prod_{m=1}^{\mu-1} a^{(m)} = a^{(\mu-1)(p)} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(\mu-1)(p)} & a_{12}^{(\mu-1)(p)} \\ a_{21}^{(\mu-1)(p)} & a_{22}^{(\mu-1)(p)} \end{bmatrix}, \quad (5.68)$$

$$\prod_{n=1}^{s-1} a^{(n)} r_a^{(s)} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(s-1)(p)} \dot{e}_{ш a}^{(s)} & a_{12}^{(s-1)(p)} \dot{i}_{ш a}^{(s)} \\ a_{21}^{(s-1)(p)} \dot{e}_{ш a}^{(s)} & a_{22}^{(s-1)(p)} \dot{i}_{ш a}^{(s)} \end{bmatrix}, \quad (5.69)$$

$$\prod_{m=1}^{\mu-1} a^{(m)} r_a^{(\mu)} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(\mu-1)(p)} \dot{e}_{ш a}^{(\mu)} & a_{12}^{(\mu-1)(p)} \dot{i}_{ш a}^{(\mu)} \\ a_{21}^{(\mu-1)(p)} \dot{e}_{ш a}^{(\mu)} & a_{22}^{(\mu-1)(p)} \dot{i}_{ш a}^{(\mu)} \end{bmatrix}. \quad (5.70)$$

Напряжения и токи  $s$ - из  $\mu$ -го четырехполюсников соединения связаны с результирующими напряжениями и токами следующими зависимостями:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(s)} \\ \dot{I}_1^{(s)} \end{bmatrix} = \prod_{n=s}^{\mu} a^{(n)} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a}^{(s)} \\ \dot{i}_{ш a}^{(s)} \end{bmatrix} + a^{(s)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a}^{(s+1)} \\ \dot{i}_{ш a}^{(s+1)} \end{bmatrix} + \\ + \dots + \prod_{m=s}^{\mu-1} a^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a}^{(\mu)} \\ \dot{i}_{ш a}^{(\mu)} \end{bmatrix}, \quad (5.71)$$

$$\begin{bmatrix} U_2^{(s)} \\ i_2^{(s)} \end{bmatrix} = \left( \prod_{k=1}^s a^{(k)} \right)^{-1} \left( \begin{bmatrix} U_1 \\ i_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_{\text{ш}a}^{(1)} \\ i_{\text{ш}a}^{(1)} \end{bmatrix} - a^{(1)} \begin{bmatrix} e_{\text{ш}a}^{(2)} \\ i_{\text{ш}a}^{(2)} \end{bmatrix} - \dots - \prod_{l=1}^{s-1} a^{(l)} \begin{bmatrix} e_{\text{ш}a}^{(s)} \\ i_{\text{ш}a}^{(s)} \end{bmatrix} \right), \quad (5.72)$$

Подставив (5.67)–(5.70) в (5.66) и раскрыв сигнальные и шумовые матрицы, получим

$$\begin{bmatrix} e_{\text{ш}a}^{(p)} \\ i_{\text{ш}a}^{(p)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{\text{ш}a}^{(1)} \\ i_{\text{ш}a}^{(1)} \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} a_{11}^{(s-1)(p)} e_{\text{ш}a}^{(s)} & a_{12}^{(s-1)(p)} i_{\text{ш}a}^{(s)} \\ a_{21}^{(s-1)(p)} e_{\text{ш}a}^{(s)} & a_{22}^{(s-1)(p)} i_{\text{ш}a}^{(s)} \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} a_{11}^{(\mu-1)(p)} e_{\text{ш}a}^{(\mu)} & a_{12}^{(\mu-1)(p)} i_{\text{ш}a}^{(\mu)} \\ a_{21}^{(\mu-1)(p)} e_{\text{ш}a}^{(\mu)} & a_{22}^{(\mu-1)(p)} i_{\text{ш}a}^{(\mu)} \end{bmatrix}, \quad (5.73)$$

откуда найдем результирующие шумовые напряжение и ток:

$$e_{\text{ш}a}^{(p)} = e_{\text{ш}a}^{(1)} + \dots + a_{11}^{(s-1)(p)} e_{\text{ш}a}^{(s)} + a_{12}^{(s-1)(p)} i_{\text{ш}a}^{(s)} + \dots + a_{11}^{(\mu-1)(p)} e_{\text{ш}a}^{(\mu)} + a_{12}^{(\mu-1)(p)} i_{\text{ш}a}^{(\mu)}, \quad (5.74)$$

$$i_{\text{ш}a}^{(p)} = i_{\text{ш}a}^{(1)} + \dots + a_{21}^{(s-1)(p)} e_{\text{ш}a}^{(s)} + a_{22}^{(s-1)(p)} i_{\text{ш}a}^{(s)} + \dots + a_{21}^{(\mu-1)(p)} e_{\text{ш}a}^{(\mu)} + a_{22}^{(\mu-1)(p)} i_{\text{ш}a}^{(\mu)}. \quad (5.75)$$

Для определения результирующих шумовых величин ступенчатого соединения воспользуемся выражениями первичных шумовых параметров (4.34), (4.43) и (4.44), которые применим также для определения аналогичных показателей  $s$ -го четырехполюсника при соответствующих ему шумовых токах и напряжениях.

Используя (5.75), после ряда промежуточных преобразований определим средний квадрат результирующего шумового тока

$$\begin{aligned} \overline{|i_{\text{ш}a}^{(p)}|^2} &= \overline{i_{\text{ш}a}^{(p)} i_{\text{ш}a}^{(p)*}} = \overline{|i_{\text{ш}a}^{(1)}|^2} + \dots + |a_{21}^{(s-1)(p)}|^2 \overline{|e_{\text{ш}a}^{(s)}|^2} + \\ &+ |a_{21}^{(s-1)(p)*} Z_{\text{коп}}^{(s)*} + a_{22}^{(s-1)(p)}|^2 \overline{|i_{\text{ш}a}^{(s)}|^2} + \dots + |a_{21}^{(\mu-1)(p)}|^2 \times \\ &\times \overline{|e_{\text{ш}a}^{(\mu)}|^2} + |a_{21}^{(\mu-1)(p)} Z_{\text{коп}}^{(\mu)} + a_{22}^{(\mu-1)(p)}|^2 \overline{|i_{\text{ш}a}^{(\mu)}|^2} \end{aligned} \quad (5.76)$$

и далее, согласно (4.44), найдем результирующую шумовую проводимость

$$G_{\text{ш}a}^{(p)} = G_{\text{ш}a}^{(1)} + \sum_{s=2}^{\mu} |a_{21}^{(s-1)(p)}|^2 R_{\text{шн}}^{(s)} +$$

$$+ \sum_{s=2}^{\mu} |a_{21}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}}^{(s)} + a_{22}^{(s-1)(p)}|^2 G_{\text{ш}a}^{(s)}. \quad (5.77)$$

Для определения результирующего корреляционного сопротивления шума воспользуемся (4.34), предварительно получив усредненное произведение шумового напряжения на сопряженный комплекс шумового тока:

$$\begin{aligned} \overline{e_{\text{ш}a}^p i_{\text{ш}a}^{(p)*}} &= Z_{\text{кор}}^{(1)} \overline{i_{\text{ш}a}^{(1)}}^2 + \dots + a_{11}^{(s-1)(p)} a_{21}^{(s-1)(p)} \overline{e_{\text{шн}}^{(p)}}^2 + \\ &+ (a_{21}^{(s-1)(p)*} Z_{\text{кор}}^{(s)*} + a_{22}^{(s-1)(p)*}) (a_{11}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}}^{(s)} + a_{12}^{(s-1)(p)*} \times \\ &\times \overline{i_{\text{ш}a}^{(s)}}^2 + \dots + a_{11}^{(\mu-1)(p)} a_{21}^{(\mu-1)(p)} \overline{e_{\text{шн}}^{(\mu)}}^2 + (a_{21}^{(\mu-1)(p)*} Z_{\text{кор}}^{(\mu)*} + \\ &+ a_{22}^{(\mu-1)(p)*}) (a_{11}^{(\mu-1)(p)} Z_{\text{кор}}^{(\mu)} + a_{12}^{(\mu-1)(p)} \overline{i_{\text{ш}a}^{(\mu)}}^2). \end{aligned} \quad (5.78)$$

Подставляя (5.76) и (5.78) в (4.34), после перехода к эквивалентным шумовым сопротивлениям и проводимостям определим

$$\begin{aligned} Z_{\text{кор}}^{(p)} &= \left[ Z_{\text{кор}}^{(1)} G_{\text{ш}a}^{(1)} + \sum_{s=2}^{\mu} a_{11}^{(s-1)(p)} a_{21}^{(s-1)(p)} R_{\text{шн}}^{(s)} + \right. \\ &+ \sum_{s=2}^{\mu} (a_{21}^{(s-1)(p)*} Z_{\text{кор}}^{(s)*} + a_{22}^{(s-1)(p)*}) (a_{11}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}}^{(s)} + \\ &+ a_{12}^{(s-1)(p)} G_{\text{ш}a}^{(s)}) \left. \left[ G_{\text{ш}a}^{(1)} + \sum_{s=2}^{\mu} |a_{21}^{(s-1)(p)}|^2 R_{\text{шн}}^{(s)} + \right. \right. \\ &+ \left. \left. \sum_{b=2}^{\mu} |a_{21}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}}^{(s)} + a_{22}^{(s-1)(p)}|^2 G_{\text{ш}a}^{(s)} \right]^{-1} \right]. \end{aligned} \quad (5.79)$$

Наконец, воспользовавшись (4.43) и  $\overline{e_{\text{шн}}^{(p)}}^2 = \overline{e_{\text{ш}a}^{(p)}}^2 - |Z_{\text{кор}}^{(p)}|^2 \overline{i_{\text{ш}a}^{(p)}}^2$ , подставляя в него (5.77) и (5.79), получим

$$\begin{aligned} R_{\text{шн}}^{(p)} &= R_{\text{шн}}^{(1)} + |Z_{\text{кор}}^{(1)}|^2 G_{\text{ш}a}^{(1)} + \sum_{s=2}^{\mu} |a_{11}^{(s-1)(p)}|^2 R_{\text{шн}}^{(s)} + \\ &+ \sum_{s=2}^{\mu} |a_{11}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}}^{(s)} + a_{12}^{(s-1)(p)}|^2 G_{\text{ш}a}^{(s)} - \left| Z_{\text{кор}}^{(1)} G_{\text{ш}a}^{(1)} + \right. \\ &+ \left. \sum_{s=1}^{\mu} a_{11}^{(s-1)(p)} a_{21}^{(s-1)(p)} R_{\text{шн}}^{(s)} + \sum_{s=2}^{\mu} (a_{21}^{(s-1)(p)*} Z_{\text{кор}}^{(s)*} + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + a_{22}^{(s-1) (p)*} \left( a_{11}^{(s-1) (p)} Z_{\text{коп}} + a_{12}^{(s-1) (p)} \right) G_{\text{ш}a}^{(s)} \Bigg|^2 \left[ G_{\text{ш}a}^{(1)} + \right. \\
& \left. + \sum_{s=2}^{\mu} \left| a_{21}^{(s-1) (p)} \right|^2 R_{\text{шн}} + \sum_{s=2}^{\mu} \left| a_{21}^{(s-1) (p)} Z_{\text{коп}} + a_{22}^{(s-1) (p)} \right|^2 G_{\text{ш}a}^{(s)} \right]^{-1}.
\end{aligned} \tag{5.80}$$

Обобщенные (5.77), (5.79) и (5.80) справедливы для ступенчатого соединения шумящих четырехплюсников любого вида (активных и пассивных) при любой последовательности их включения.

*Частный случай.* Соединение идентичных шумящих четырехплюсников.

При ступенчатом соединении идентичных шумящих четырехплюсников, имеющих одноименные сигнальные параметры равной величины  $a_{11}^{(s)} = a_{11}$ ,  $a_{12}^{(s)} = a_{12}$ ,  $a_{21}^{(s)} = a_{21}$ ,  $a_{22}^{(s)} = a_{22}$  и одинаковые шумовые величины  $e_{\text{ш}a}^{(s)} = e_{\text{ш}a}$  и  $i_{\text{ш}a}^{(s)} = i_{\text{ш}a}$ , результирующая сигнальная матрица

$$\mathbf{a}^{(p)} = \mathbf{a}^{\mu} \tag{5.81}$$

и шумовые параметры, получаемые из (5.77)–(5.80):

$$\begin{aligned}
G_{\text{ш}a}^{(p)} &= G_{\text{ш}a} \left( 1 + \sum_{s=2}^{\mu} \left| a_{21}^{(s-1) (p)} Z_{\text{коп}} + a_{22}^{(s-1) (p)} \right|^2 \right) + \\
&+ R_{\text{шн}} \sum_{s=2}^{\mu} \left| a_{21}^{(s-1) (p)} \right|^2,
\end{aligned} \tag{5.82}$$

$$\begin{aligned}
Z_{\text{коп}}^{(p)} &= \left\{ G_{\text{ш}a} \left[ Z_{\text{коп}} + \sum_{s=2}^{\mu} \left( a_{21}^{(s-1) (p)*} Z_{\text{коп}}^* + a_{22}^{(s-1) (p)*} \right) \times \right. \right. \\
&\times \left. \left. \left( a_{11}^{(s-1) (p)} Z_{\text{коп}} + a_{12}^{(s-1) (p)} \right) \right] + R_{\text{шн}} \sum_{s=2}^{\mu} a_{11}^{(s-1) (p)} a_{21}^{(s-1) (p)} \right\} \times \\
&\times \left[ G_{\text{ш}a} \left( 1 + \sum_{s=2}^{\mu} \left| a_{21}^{(s-1) (p)} Z_{\text{коп}} + a_{22}^{(s-1) (p)} \right|^2 \right) + \right. \\
&\left. + R_{\text{шн}} \sum_{s=2}^{\mu} \left| a_{21}^{(s-1) (p)} \right|^2 \right]^{-1}.
\end{aligned} \tag{5.83}$$

$$R_{\text{шк}}^{(p)} = R_{\text{шн}} \left( 1 + \sum_{s=2}^{\mu} \left| a_{11}^{(s-1) (p)} \right|^2 \right) + G_{\text{ш}a} \left( \left| Z_{\text{коп}} \right|^2 + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{s=2}^{\mu} \left| a_{11}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}} + a_{12}^{(s-1)(p)} \right|^2 \Big) - \left[ G_{\text{шг}} \left[ Z_{\text{кор}} + \right. \right. \\
& + \left. \sum_{s=2}^{\mu} \left( a_{21}^{(s-1)(p)*} Z_{\text{кор}}^* + a_{22}^{(s-1)(p)*} \right) \left( a_{11}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}} + a_{12}^{(s-1)(p)} \right) \right] + \\
& + R_{\text{шн}} \sum_{s=2}^{\mu} a_{11}^{(s-1)(p)} a_{21}^{(s-1)(p)} \Big] \left[ G_{\text{шг}} \left( 1 + \sum_{s=2}^{\mu} \left| a_{21}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}} + \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. + a_{22}^{(s-1)(p)} \right|^2 + R_{\text{шн}} \sum_{s=2}^{\mu} \left| a_{21}^{(s-1)(p)} \right|^2 \right) \right]^{-1}. \tag{5.84}
\end{aligned}$$

Выражения (5.77) — (5.84) позволяют определить условия шумового согласования и сопряжения результирующего четырехполюсника с источником сигнала.

Для шумового согласования сигнала необходимо, чтобы активная составляющая внутреннего сопротивления источника сигнала удовлетворяла равенству  $R_1 = R_{1\text{ опт}}^{(p)} = \left( \frac{R_{\text{шн}}^{(p)}}{G_{\text{шг}}^{(p)}} + |i X_1 + Z_{\text{кор}}^{(p)}|^2 \right)^{1/2}$ , если задана реактивная составляющая  $X_1$ .

При шумовом сопряжении сложного соединения с источником сигнала требуется выполнение условий

$$X_1 = -X_{\text{кор}}^{(p)} \text{ и } R_1 = R_{1\text{ мин}}^{(p)} = \left[ \left( R_{\text{шн}}^{(p)} / G_{\text{шг}}^{(p)} \right) + R_{\text{кор}}^{(p)2} \right]^{1/2}.$$

В общем случае коррелированных источников шума условия шумового согласования и сопряжения отличаются от общеизвестных требований для согласования и сопряжения цепи по сигнальным показателям, но в частном — при отсутствии корреляции — совпадают.

Выполнения условий шумового согласования или сопряжения только на входе первого четырехполюсника недостаточно для минимизации результирующего коэффициента шума ступенчатого соединения. Аналогичные условия должны выполняться на входе каждого из шумящих четырехполюсников с учетом влияния флуктуаций всех последующих ступеней.

Результирующие шумовые параметры части ступенчатого соединения, содержащего  $(\mu - s)$ -х четырехполюсников, определяются по (5.77) — (5.80), исходя из того, что соединения начинается с  $(s + 1)$ -го звена:

$$G_{\text{ш } a}^{(\mu-s)(p)} = G_{\text{ш } a}^{(s+1)} + \sum_{n=s+1}^{\mu-1} |a_{21}^{(n)(p)}|^2 R_{\text{шн}}^{(n+1)} +$$

$$+ \sum_{n=s+1}^{\mu-1} |a_{21}^{(n)(p)} Z_{\text{коп}}^{(n+1)} + a_{22}^{(n)(p)}|^2 G_{\text{ш } a}^{(n+1)}, \quad (5.85)$$

$$Z_{\text{коп}}^{(\mu-s)(p)} = \left[ Z_{\text{коп}}^{(s+1)} G_{\text{ш } a}^{(s+1)} + \sum_{n=s+1}^{\mu-1} a_{11}^{(n)(p)} a_{21}^{(n)(p)} R_{\text{шн}}^{(n+1)} + \right.$$

$$+ \sum_{n=s+1}^{\mu-1} (a_{21}^{(n)(p)*} Z_{\text{коп}}^{(n+1)*} + a_{22}^{(n)(p)*}) (a_{11}^{(n)(p)} Z_{\text{коп}}^{(n+1)} +$$

$$+ a_{12}^{(n)(p)} G_{\text{ш } a}^{(n+1)}) \left. \right] \left[ G_{\text{ш } a}^{(s+1)} + \sum_{n=s+1}^{\mu-1} |a_{21}^{(n)(p)}|^2 R_{\text{шн}}^{(n+1)} + \right.$$

$$+ \sum_{n=s+1}^{\mu-1} a_{21}^{(n)(p)} Z_{\text{коп}}^{(n+1)} + a_{22}^{(n)(p)}|^2 G_{\text{ш } a}^{(n+1)} \left. \right]^{-1}, \quad (5.86)$$

$$R_{\text{шн}}^{(\mu-s)(p)} = R_{\text{шн}}^{(s+1)} |Z_{\text{коп}}^{(s+1)}|^2 G_{\text{ш } a}^{(s+1)} + \sum_{n=s+1}^{\mu-1} |a_{11}^{(n)(p)}|^2 R_{\text{шн}}^{(n+1)} +$$

$$+ \sum_{n=s+1}^{\mu-1} |a_{11}^{(n)(p)} Z_{\text{коп}}^{(n+1)} + a_{12}^{(n)(p)}|^2 G_{\text{ш } a}^{(n+1)} - \left| Z_{\text{коп}}^{(s+1)} G_{\text{ш } a}^{(s+1)} + \right.$$

$$+ \sum_{n=s+1}^{\mu-1} a_{11}^{(n)(p)} a_{21}^{(n)(p)} R_{\text{шн}}^{(n+1)} + \sum_{n=s+1}^{\mu-1} (a_{21}^{(n)(p)*} Z_{\text{коп}}^{(n+1)*} +$$

$$+ a_{22}^{(n)(p)*}) (a_{11}^{(n)(p)} Z_{\text{коп}}^{(n+1)} + a_{12}^{(n)(p)}) G_{\text{ш } a}^{(n+1)} \left. \right|^2 \times$$

$$\times \left[ G_{\text{ш } a}^{(s+1)} + \sum_{n=s+1}^{\mu-1} |a_{21}^{(n)(p)}|^2 R_{\text{шн}}^{(n+1)} + \sum_{n=s+1}^{\mu-1} |a_{21}^{(n)(p)} Z_{\text{коп}}^{(n+1)} + \right.$$

$$+ a_{22}^{(n)(p)}|^2 G_{\text{ш } a}^{(n+1)} \left. \right]^{-1}. \quad (5.87)$$

Шумовые параметры (5.77) — (5.87) учитывают внутренние флуктуации всех составляющих ступенчатого соединения, за исключением нагрузки, которая принимается во внимание в случае определения результирующего коэффициента шума системы передачи.

## 5.7. ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Цепи с распределенными параметрами в виде однородных линий и различного ряда функциональных устройств имеют широкое применение. С освоением методов микроэлектроники их начали использовать на низких частотах в виде  $RC$ -цепей с распределенными параметрами. В сочетании с активными элементами такие цепи позволяют осуществлять многие функциональные узлы и в их числе различного рода фильтры [36, 48, 82].

Переход на  $RC$ -цепи с распределенными параметрами вызван трудностями, встретившимися при создании микрокатушек с высокой добротностью. Попытки компенсировать потери в них при помощи отрицательных сопротивлений пока к удовлетворительным результатам не привели.

Применение  $RC$ -цепей с распределенными параметрами также не лишено затруднений, в частности, обусловленных влиянием на сигнал внутренних шумов (неоизмеримо возросших по сравнению с традиционными  $LC$ -цепями).

Снижению воздействия последних на сигнал может в значительной мере способствовать анализ шумовых свойств цепей с распределенными параметрами, которому до последнего времени не уделялось достаточного внимания. Рассмотрим цепи с распределенными параметрами, используя общие положения теории автономного четырехполюсника и шумящих цепей с сосредоточенными параметрами [35, 85]. Наличие шумовых напряжений на разомкнутых выводах и шумовых токов в режиме короткого замыкания цепи с распределенными параметрами при отключенных внешних источниках энергии является достаточным основанием для этого.

Учитывая наиболее часто встречающееся совместное использование цепей с распределенными и сосредоточенными параметрами, рассмотрим шумовые свойства однородных и неоднородных структур.

*Однородные шумящие цепи.* Для оценки передающих и автономных свойств однородной цепи с распределенными параметрами применяется разделение ее на элементарные участки, равномерно рассредоточенные по всей ее длине [35]. Подобным же приемом воспользуемся для анализа шумовых свойств однородной цепи (рис. 5.7а). Разобьем последнюю на элементарные участки  $\Delta x$ , отстоящие от начала цепи на расстояние  $x$ ,

и предположим, что вся цепь состоит из таких участков (рис. 5.7б). Совершенно очевидно, что точность шумовой схемы замещения однородной цепи при сохранении постоянства  $l = \mu \Delta x$  возрастает с увеличением  $\mu$  и уменьшением  $\Delta x$ .

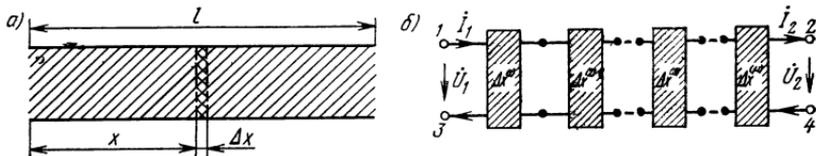


Рис. 5.7. Шумящая однородная цепь (а), представленная ступенчатым соединением элементарных четырехполюсников (б)

Выделенный из шумящей цепи  $s$ -й элементарный участок  $\Delta x^{(s)}$  представляет собой шумящий четырехполюсник (рис. 5.8а), который охарактеризуем сигналь-

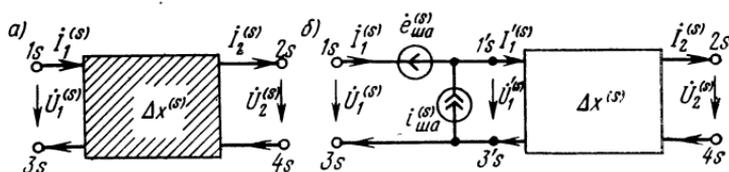


Рис. 5.8. Шумящий элементарный четырехполюсник (а) с вынесенными источниками шума (б)

ными параметрами  $a_{11}^{(s)}$ ,  $a_{12}^{(s)}$ ,  $a_{21}^{(s)}$ ,  $a_{22}^{(s)}$  и эквивалентными источниками шума  $e_{шa}^{(s)}$  и  $i_{шa}^{(s)}$  (рис. 5.8б). Свойства однородной шумящей цепи, представленной в виде ступенчатого соединения  $\mu$  элементарных шумящих четырехполюсников, выражаются соотношениями (5.65) и (5.66).

Через характеристические постоянные матрица результирующих сигнальных параметров записывается в виде

$$a^{(p)} = \begin{bmatrix} \text{ch } \gamma l & Z_c \text{ sh } \gamma l \\ Z_a^{-1} \text{ sh } \gamma l & \text{ch } \gamma l \end{bmatrix}. \quad (5.88)$$

Входящие в нее характеристическое (волновое) сопротивление и коэффициент распространения определяются известными соотношениями [23]

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}}, \quad \gamma = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)},$$

где  $R, L, G, C$  — первичные сигнальные параметры цепи.

Воспользуемся (5.73) и выразим через характеристические постоянные результирующие шумовые напряжения и ток:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_{ш a}^{(p)} \\ i_{ш a}^{(p)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} e_{ш a}^{(1)} \\ i_{ш a}^{(1)} \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a}^{(s)} \\ i_{ш a}^{(s)} \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \gamma (s-1) l_{\mu}^{-1} & Z_c \operatorname{sh} (s-1) l_{\mu}^{-1} \\ Z_c^{-1} \operatorname{sh} \gamma (s-1) l_{\mu}^{-1} & \operatorname{ch} \gamma (s-1) l_{\mu}^{-1} \end{bmatrix} + \dots \\ &\dots + \begin{bmatrix} e_{ш a}^{(\mu)} \\ i_{ш a}^{(\mu)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \gamma (\mu-1) l_{\mu}^{-1} & Z_c \operatorname{sh} \gamma (\mu-1) l_{\mu}^{-1} \\ Z_c^{-1} \operatorname{sh} \gamma (\mu-1) l_{\mu}^{-1} & \operatorname{ch} \gamma (\mu-1) l_{\mu}^{-1} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5.89)$$

При  $\mu \rightarrow \infty$  (5.89) принимает вид

$$\begin{bmatrix} e_{ш a}^{(p)} \\ i_{ш a}^{(p)} \end{bmatrix} = \int_0^l \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \gamma x & Z_c \operatorname{sh} \gamma x \\ Z_c^{-1} \operatorname{sh} \gamma x & \operatorname{ch} \gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a}(x) \\ i_{ш a}(x) \end{bmatrix} dx, \quad (5.90)$$

из которого определим результирующие шумовые источники:

$$e_{ш a}^{(p)} = \int_0^l [\dot{e}_{ш a}(x) \operatorname{ch} \gamma x + Z_c i_{ш a}(x) \operatorname{sh} \gamma x] dx, \quad (5.91)$$

$$i_{ш a}^{(p)} = \int_0^l [Z_c^{-1} \dot{e}_{ш a}(x) \operatorname{sh} \gamma x + i_{ш a}(x) \operatorname{ch} \gamma x] dx, \quad (5.92)$$

где  $\dot{e}_{ш a}(x)$  и  $i_{ш a}(x)$  — задающие источники шума в точке, отстоящей на расстояние  $x$  от начала цепи, относенные к единице длины.

Используя соотношения между сигнальными параметрами шумящей цепи, найдем выражения для задающих шумовых токов и напряжений в наиболее распространенных системах параметров, которые сведены в табл. 5.1.

Если флуктуации однородной цепи учитываются только параллельно или последовательно включенными источниками шума, то для определения результирующих шумовых источников в тех же системах параметров получим формулы табл. 5.2.

*Неоднородные шумящие цепи.* Решение многих технических задач осуществляется на базе соединений однородных цепей и четырехполюсников с сосредоточенны-

Таблица 5.1

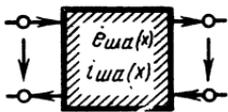
Величина	 <p style="text-align: center;"><math>e_{шa}(x) \neq 0, i_{шa}(x) \neq 0</math></p>
$\dot{e}_{шa}$	$\int_0^l [\text{ch } \gamma x \dot{e}_{шa}(x) + Z_c \text{sh } \gamma x i_{шa}(x)] dx$
$i_{шa}$	$\frac{1}{Z_c} \int_0^l [\text{sh } \gamma x \dot{e}_{шa}(x) + Z_c \text{ch } \gamma x i_{шa}(x)] dx$
$\dot{e}_{шb}$	$-\int_0^l [\text{ch } \gamma (l-x) \dot{e}_{шa}(x) - Z_c \text{sh } \gamma (l-x) i_{шa}(x)] dx$
$i_{шb}$	$\frac{1}{Z_c} \int_0^l [\text{sh } \gamma (l-x) \dot{e}_{шa}(x) - Z_c \text{ch } \gamma (l-x) i_{шa}(x)] dx$
$\dot{e}_{шh}$	$\frac{1}{\text{ch } \gamma l} \int_0^l [\text{ch } \gamma (l-x) \dot{e}_{шa}(x) - Z_c \text{sh } \gamma (l-x) i_{шa}(x)] dx$
$i_{шh}$	$-\frac{1}{Z_c \text{ch } \gamma l} \int_0^l [\text{sh } \gamma x \dot{e}_{шa}(x) + Z_c \text{ch } \gamma x i_{шa}(x)] dx$
$\dot{e}_{шf}$	$-\frac{1}{\text{ch } \gamma l} \int_0^l [\text{ch } \gamma x \dot{e}_{шa}(x) + Z_c \text{sh } \gamma x i_{шa}(x)] dx$
$i_{шf}$	$-\frac{1}{Z_c \text{ch } \gamma l} \int_0^l [\text{sh } \gamma (l-x) \dot{e}_{шa}(x) - Z_c \text{ch } \gamma (l-x) i_{шa}(x)] dx$
$\dot{e}_{шz1}$	$\frac{1}{\text{sh } \gamma l} \int_0^l [\text{sh } \gamma (l-x) \dot{e}_{шa}(x) - Z_c \text{ch } \gamma (l-x) i_{шa}(x)] dx$
$\dot{e}_{шz2}$	$-\frac{1}{\text{sh } \gamma l} \int_0^l [\text{sh } \gamma x \dot{e}_{шa}(x) + Z_c \text{ch } \gamma x i_{шa}(x)] dx$
$i_{шы1}$	$-\frac{1}{Z_c \text{sh } \gamma l} \int_0^l [\text{ch } \gamma (l-x) \dot{e}_{шa}(x) - Z_c \text{sh } \gamma (l-x) i_{шa}(x)] dx$
$i_{шы2}$	$-\frac{1}{Z_c \text{sh } \gamma l} \int_0^l [\text{ch } \gamma x \dot{e}_{шa}(x) + Z_c \text{sh } \gamma x i_{шa}(x)] dx$

Таблица 5.2

Величина		
	$e_{III}(x) \neq 0, i_{III}(x) = 0$	$e_{III}(x) = 0, i_{III}(x) \neq 0$
$e_{IIIa}$	$\int_0^l \operatorname{ch} \gamma_x \dot{e}_{III}(x) dx$	$Z_c \int_1^l \operatorname{sh} \gamma_x i_{III}(x) dx$
$i_{IIIa}$	$\frac{1}{Z_c} \int_0^l \operatorname{sh} \gamma_x \dot{e}_{III}(x) dx$	$\int_0^l \operatorname{ch} \gamma_x i_{III}(x) dx$
$\dot{e}_{IIIb}$	$-\int_0^l \operatorname{ch} \gamma(l-x) \dot{e}_{III}(x) dx$	$Z_c \int_0^l \operatorname{sh} \gamma(l-x) i_{III}(x) dx$
$i_{IIIb}$	$\frac{1}{Z_c} \int_0^l \operatorname{sh} \gamma(l-x) \dot{e}_{III}(x) dx$	$-\int_0^l \operatorname{ch} \gamma(l-x) i_{III}(x) dx$
$\dot{e}_{IIIh}$	$\frac{1}{\operatorname{ch} \gamma l} \int_0^l \operatorname{ch} \gamma(l-x) \dot{e}_{III}(x) dx$	$-\frac{Z_c}{\operatorname{ch} \gamma l} \int_0^l \operatorname{sh} \gamma(l-x) i_{III}(x) dx$
$i_{IIIh}$	$-\frac{1}{Z_c \operatorname{ch} \gamma l} \int_0^l \operatorname{sh} \gamma_x \dot{e}_{III}(x) dx$	$-\frac{1}{\operatorname{ch} \gamma l} \int_0^l \operatorname{ch} \gamma_x i_{III}(x) dx$
$\dot{e}_{IIIj}$	$-\frac{1}{\operatorname{ch} \gamma l} \int_0^l \operatorname{ch} \gamma_x \dot{e}_{III}(x) dx$	$-\frac{Z_c}{\operatorname{ch} \gamma l} \int_0^l \operatorname{sh} \gamma_x i_{III}(x) dx$
$i_{IIIj}$	$-\frac{1}{Z_c \operatorname{ch} \gamma l} \int_0^l \operatorname{sh} \gamma(l-x) \dot{e}_{III}(x) dx$	$\frac{1}{Z_c \operatorname{ch} \gamma l} \int_0^l \operatorname{ch} \gamma(l-x) i_{III}(x) dx$
$\dot{e}_{IIIz1}$	$\frac{1}{\operatorname{sh} \gamma l} \int_0^l \operatorname{sh} \gamma(l-x) \dot{e}_{III}(x) dx$	$-\frac{Z_c}{\operatorname{sh} \gamma l} \int_0^l \operatorname{ch} \gamma(l-x) i_{III}(x) dx$
$\dot{e}_{IIIz2}$	$-\frac{1}{\operatorname{sh} \gamma l} \int_0^l \operatorname{sh} \gamma_x \dot{e}_{III}(x) dx$	$-\frac{Z_c}{\operatorname{sh} \gamma l} \int_0^l \operatorname{ch} \gamma_x i_{III}(x) dx$
$i_{IIIy1}$	$-\frac{1}{Z_c \operatorname{sh} \gamma l} \int_0^l \operatorname{ch} \gamma(l-x) \dot{e}_{III}(x) dx$	$\frac{1}{\operatorname{sh} \gamma l} \int_0^l \operatorname{sh} \gamma(l-x) i_{III}(x) dx$
$i_{IIIy2}$	$-\frac{1}{Z_c \operatorname{sh} \gamma l} \int_0^l \operatorname{ch} \gamma_x \dot{e}_{III}(x) dx$	$-\frac{1}{\operatorname{sh} \gamma l} \int_0^l \operatorname{sh} \gamma_x i_{III}(x) dx$

ми параметрами. Примерами таких структур являются линии связи с промежуточными усилителями или  $RC$ -транзисторные цепи, широко применяемые в микроэлектронных устройствах.

Представим неоднородную шумящую цепь в виде соединения чередующихся шумящих четырехполюсников с сосредоточенными параметрами  $c_1, \dots, c_s, \dots, c_\mu$ , соединенных между собой звеньями  $p_1, \dots, p_s, \dots, p_\mu$ , длиной  $l_1, \dots, l_s, \dots, l_\mu$ , которые согласно изложенному выше будем рассматривать как шумящие четырехполюсники с распределенными параметрами (рис. 5.9а). В результате по-

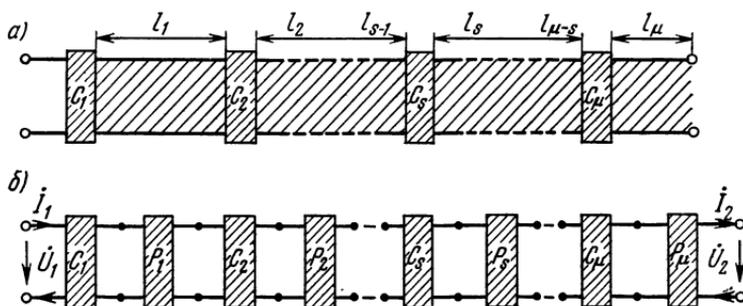


Рис. 5.9. Шумящая неоднородная цепь (а), представленная в виде ступенчатого соединения шумящих четырехполюсников (б)

лучим неоднородную шумящую цепь в виде ступенчатого соединения чередующихся шумящих четырехполюсников с сосредоточенными и распределенными параметрами  $c_1 p_1, \dots, c_s p_s, \dots, c_\mu p_\mu$ , (рис. 5.9б).

Каждый из четырехполюсников в отдельности характеризуется сигнальными параметрами: например,  $s$ - $y$  —  $a_{11c}^{(s)}, a_{12c}^{(s)}, a_{21c}^{(s)}$  и  $a_{22c}^{(s)}$  — при сосредоточенных параметрах (рис. 5.10) и  $a_{11p}^{(s)}, a_{12p}^{(s)}, a_{21p}^{(s)}, a_{22p}^{(s)}$  — при распределенных

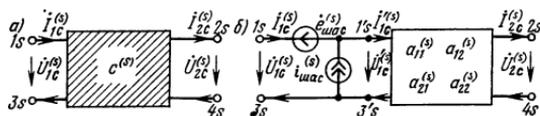


Рис. 5.10. Шумящий четырехполюсник с сосредоточенными параметрами (а), с вынесенными источниками шума (б)

(рис. 5.11). Флуктуационные свойства четырехполюсников соответственно учитываются задающими источниками

ми шума  $\dot{e}_{ш а с}^{(s)}$ ,  $i_{ш а с}^{(s)}$ ,  $\dot{e}_{ш а р}^{(s)}$  и  $i_{ш а р}^{(s)}$ , включенными на входе каждого из них.

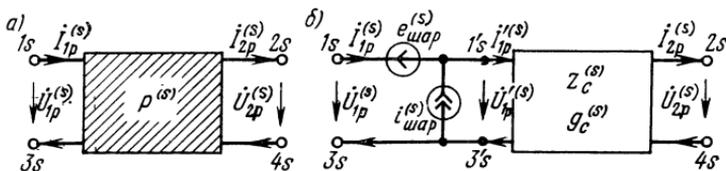


Рис. 5.14. Шумящий четырехполюсник с распределенными параметрами (а), с вынесенными источниками шума (б)

Используя (5.65), получим результирующую сигнальную матрицу

$$a^{(p)} = \prod_{n=1}^{\mu} a_c^{(n)} \prod_{m=1}^{\mu} a_p^{(m)} \quad (5.93)$$

и в соответствии с (5.73) — результирующую шумовую матрицу неоднородной цепи

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш а}^{(p)} \\ i_{ш а}^{(p)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш а с}^{(1)} \\ i_{ш а с}^{(1)} \end{bmatrix} + a_c^{(1)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш а р}^{(1)} \\ i_{ш а р}^{(1)} \end{bmatrix} + \dots + \\ &+ \prod_{n=1}^{s-1} a_c^{(n)} \prod_{m=1}^{s-1} a_p^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш а с}^{(s)} \\ i_{ш а с}^{(s)} \end{bmatrix} + \prod_{n=1}^s a_c^{(n)} \prod_{m=1}^{s-1} a_p^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш а р}^{(s)} \\ i_{ш а р}^{(s)} \end{bmatrix} + \dots + \\ &+ \prod_{n=1}^{\mu-1} a_c^{(n)} \prod_{m=1}^{\mu-1} a_p^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш а с}^{(\mu)} \\ i_{ш а с}^{(\mu)} \end{bmatrix} + \prod_{n=1}^{\mu} a_c^{(n)} \prod_{m=1}^{\mu-1} a_p^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш а р}^{(\mu)} \\ i_{ш а р}^{(\mu)} \end{bmatrix}. \quad (5.94) \end{aligned}$$

При анализе шумовых свойств неоднородной цепи в зависимости от структуры ее и условий поставленной задачи используются соответствующие величины  $a_p$ ,  $e_{ш а р}$  и  $i_{ш а р}$  из табл. 5.1 и 5.2 или табл. 5.3, в которой даны шумовые токи и напряжения при различных законах распределения источников шума, а для  $a_c$ ,  $e_{ш а с}$  и  $i_{ш а с}$  — из табл. 4.1 и П.1.

Напряжения и токи любого из промежуточных четырехполюсников, образующих неоднородную шумящую цепь, определим из выражений (5.71) и (5.72). Учтя особенности рассматриваемого случая, в итоге получим:

Распредел. источников шума	Величина	$\dot{e}_{шa} \neq 0, i_{шa} \neq 0$		$\dot{e}_{шa} \neq 0, i_{шa} = 0$		$\dot{e}_{шa} = 0, i_{шa} \neq 0$	
		$\dot{e}_{шa}(x) = \dot{e}_{шa}$	$i_{шa}^{(p)}$	$\frac{1}{\gamma} [\text{sh } \gamma l \dot{e}_{шa} + Z_c (\text{ch } \gamma l - 1) i_{шa}]$	$\frac{1}{\gamma} \text{sh } \gamma l \dot{e}_{шa}$	$\frac{Z_c}{\gamma} (\text{ch } \gamma l - 1) i_{шa}$	
$i_{шa}(x) = i_{шa}$	$i_{шa}^{(p)}$	$\frac{1}{\gamma} \left[ \frac{1}{Z_c} (\text{ch } \gamma l - 1) \dot{e}_{шa} + \text{sh } \gamma l i_{шa} \right]$	$\frac{1}{\gamma Z_c} (\text{ch } \gamma l - 1) \dot{e}_{шa}$	$\frac{1}{\gamma} \text{sh } \gamma l i_{шa}$			
$\dot{e}_{шa}(x) = \dot{e}_{шa}^x$ $i_{шa}(x) = i_{шa}^x$	$\dot{e}_{шa}^{(p)}$	$\frac{1}{\gamma^2} [(\gamma l \text{sh } l - \text{ch } \gamma l + 1) e_{шa} + Z_c (\gamma l \text{ch } \gamma l - \text{sh } \gamma l) i_{шa}]$	$\frac{1}{\gamma^2} (\gamma l \text{sh } \gamma l - \text{ch } \gamma l + 1) \dot{e}_{шa}$	$\frac{Z_c}{\gamma^2} (\gamma l \text{ch } \gamma l - \text{sh } \gamma l) i_{шa}$			
	$i_{шa}^{(p)}$	$\frac{1}{\gamma^2} [\gamma l \text{ch } \gamma l - \text{sh } \gamma l] \dot{e}_{шa} + (\gamma l \text{sh } \gamma l - \text{ch } \gamma l + 1) i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 Z_c} (\gamma l \text{ch } \gamma l - \text{sh } \gamma l) \dot{e}_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2} (\gamma l \text{sh } \gamma l - \text{ch } \gamma l + 1) i_{шa}$			
$\dot{e}_{шa}(x) = \dot{e}_{шa} l^{-\eta x}$ $i_{шa}(x) = i_{шa} l^{-\eta x}$	$\dot{e}_{шa}^{(p)}$	$\frac{1}{\gamma^2 \eta^2} \{ l^{-\eta l} (\gamma \text{sh } \gamma l + \eta \text{ch } \gamma l) - \eta \} \dot{e}_{шa} + Z_c [ e^{-\eta l} (\eta \text{sh } \gamma l + \gamma \text{ch } \gamma l) - \gamma ] i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 - \eta^2} [ e^{-\eta l} (\gamma \text{sh } \gamma l + \eta \text{ch } \gamma l) - \eta ] \dot{e}_{шa}$	$\frac{Z_c}{(\gamma^2 - \eta^2)} [ l^{-\eta l} (\eta \text{sh } \gamma l + \gamma \text{ch } \gamma l) - \gamma ] i_{шa}$			
	$i_{шa}^{(p)}$	$\frac{1}{\gamma^2 - \eta^2} \left\{ Z_c [ e^{-\eta l} (\eta \text{sh } \gamma l + \gamma \text{ch } \gamma l) - \gamma ] \times \dot{e}_{шa} + [ e^{-\eta l} (\gamma \text{sh } \gamma l + \eta \text{ch } \gamma l) - \eta ] i_{шa} \right\}$	$\frac{1}{\gamma^2 - \eta^2} Z_c [ e^{-\eta l} (\eta \text{sh } \gamma l + \gamma \text{ch } \gamma l) - \eta ] \dot{e}_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 - \eta^2} [ l^{-\eta l} (\gamma \text{sh } \gamma l + \eta \text{ch } \gamma l) - \eta ] i_{шa}$			



Продолжение табл. 5.3

Распредел. источников шума	Величина	$\dot{e}_{шa} \neq 0, i_{шa} \neq 0$		$\dot{e}_{шa} \neq 0, i_{шa} = 0$		$\dot{e}_{шa} = 0, i_{шa} \neq 0$	
		$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} [(\gamma \sin \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l) \times \operatorname{ch} \gamma l + \eta] \dot{e}_{шa} + Z_c (\gamma \sin \eta l \operatorname{ch} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l - \gamma) i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} [(\gamma \sin \eta l \operatorname{ch} \gamma l - \eta \cos \eta l) \times \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \eta] i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} (\gamma \sin \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \eta) \dot{e}_{шa}$	$\frac{1}{(\gamma^2 + \eta^2) Z_c} (\gamma \sin \eta l \operatorname{ch} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{sh} \gamma l) \dot{e}_{шa}$	$\frac{Z_c}{(\gamma^2 + \eta^2) - \eta \cos \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \gamma} i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} (\gamma \sin \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \eta) i_{шa}$
$\dot{e}_{шa}(x) = \dot{e}_{шa} \sin \eta x$ $i_{шa}(x) = i_{шa} \sin \eta x$	$i_{шa}^{(p)}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} [(\eta \sin \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \gamma \cos \eta l) \times \operatorname{sh} \gamma l + \eta] \dot{e}_{шa} + Z_c (\eta \sin \eta l \operatorname{sh} \gamma l + \gamma \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l - \gamma) i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} [(\eta \sin \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \gamma \cos \eta l) \times \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \eta] i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} (\eta \sin \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \gamma \cos \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \gamma) \dot{e}_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} (\eta \sin \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \eta) i_{шa}$	$\frac{Z_c}{(\gamma^2 + \eta^2) + \gamma \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l - \gamma} i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} (\eta \sin \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \gamma \cos \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \gamma) \dot{e}_{шa}$
$\dot{e}_{шa}(x) = \dot{e}_{шa} \cos \eta x$ $i_{шa}(x) = i_{шa} \cos \eta x$	$i_{шa}^{(p)}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} [(\eta \sin \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l) \times \operatorname{ch} \gamma l + \eta] \dot{e}_{шa} + (\eta \sin \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \eta) i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} [(\eta \sin \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l) \times \operatorname{ch} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{sh} \gamma l + \eta] i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} (\eta \sin \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \eta) \dot{e}_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} (\eta \sin \eta l \operatorname{ch} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{sh} \gamma l + \eta) i_{шa}$	$\frac{Z_c}{(\gamma^2 + \eta^2) - \eta \cos \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \gamma} i_{шa}$	$\frac{1}{\gamma^2 + \eta^2} (\eta \sin \eta l \operatorname{sh} \gamma l - \eta \cos \eta l \operatorname{ch} \gamma l + \eta) \dot{e}_{шa}$



— для четырехполюсников с сосредоточенными параметрами

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1c}^{(s)} \\ \dot{i}_{1c}^{(s)} \end{bmatrix} &= \prod_{n=s}^{\mu} a_c^{(n)} \prod_{m=s}^{\mu} a_p^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{i}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a c}^{(s)} \\ \dot{i}_{ш a c}^{(s)} \end{bmatrix} + a_c^{(s)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a p}^{(s)} \\ \dot{i}_{ш a p}^{(s)} \end{bmatrix} + \\ &+ \dots + \prod_{n=s}^{\mu} a_c^{(n)} \prod_{m=s}^{\mu-1} a_p^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a p}^{(\mu)} \\ \dot{i}_{ш a p}^{(\mu)} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5.95)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_{2c}^{(s)} \\ \dot{i}_{2c}^{(s)} \end{bmatrix} &= \left( \prod_{n=1}^s a_c^{(n)} \prod_{m=1}^{s-1} a_p^{(m)} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{i}_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a c}^{(1)} \\ \dot{i}_{ш a c}^{(1)} \end{bmatrix} - \\ &- a_c^{(1)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a p}^{(1)} \\ \dot{i}_{ш a p}^{(1)} \end{bmatrix} - \dots - \prod_{n=1}^s a_c^{(n)} \prod_{m=1}^{s-1} a_p^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a c}^{(s)} \\ \dot{i}_{ш a c}^{(s)} \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (5.96)$$

— для четырехполюсников с распределенными параметрами:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1p}^{(s)} \\ \dot{i}_{1p}^{(s)} \end{bmatrix} &= \prod_{n=s+1}^{\mu} a_c^{(n)} \prod_{m=s}^{\mu} a_p^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{i}_2 \end{bmatrix} + a_p^{(s)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a c}^{(s+1)} \\ \dot{i}_{ш a c}^{(s+1)} \end{bmatrix} + \dots + \\ &+ \prod_{n=s+1}^{\mu} a_c^{(n)} \prod_{m=s}^{\mu-1} a_p^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a p}^{(\mu)} \\ \dot{i}_{ш a p}^{(\mu)} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5.97)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{U}_{2p}^{(s)} \\ \dot{i}_{2p}^{(s)} \end{bmatrix} &= \left( \prod_{n=1}^s a_c^{(n)} \prod_{m=1}^s a_p^{(m)} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{i}_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a c}^{(1)} \\ \dot{i}_{ш a c}^{(1)} \end{bmatrix} - \\ &- a_c^{(1)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a p}^{(1)} \\ \dot{i}_{ш a p}^{(1)} \end{bmatrix} - \dots - \prod_{n=1}^s a_c^{(n)} \prod_{m=1}^{s-1} a_p^{(m)} \begin{bmatrix} \dot{e}_{ш a p}^{(s)} \\ \dot{i}_{ш a p}^{(s)} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5.98)$$

Полученные выражения позволяют найти результирующие параметры, шумовые токи и напряжения гибридной цепи при любой последовательности или сочетании шумящих четырехполюсников с распределенными и сосредоточенными параметрами.

## 5.8. РЕЗУЛЬТИРУЮЩИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА

Подставив в (4.74) шумовые параметры сложного соединения, получим его результирующий избыточный коэффициент шума

$$F_n^{(p)} = \frac{R_{шн}^{(p)} + G_{ш a}^{(p)} |Z_1 + Z_{коп}^{(p)}|^2}{R_{шн}}, \quad (5.99)$$

который принимает оптимальное значение при условии, определяемом (4.75),

$$R_{1 \text{ опт}}^{(p)} = \left( \frac{R_{\text{шн}}^{(p)} + G_{\text{ш а}}^{(p)} |i X_1 + Z_{\text{кор}}^{(p)}|^2}{G_{\text{ш а}}^{(p)}} \right)^{1/2}, \quad (5.100)$$

а минимальную величину — (4.79).

$$R_{1 \text{ мин}}^{(p)} = \left( \frac{R_{\text{шн}}^{(p)} + G_{\text{ш а}}^{(p)} R_{\text{кор}}^{(p) 2}}{G_{\text{ш а}}^{(p)}} \right)^{1/2}. \quad (5.101)$$

При выполнении этих условий

$$F_{\text{и опт}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн}}^{(p)} + G_{\text{ш а}}^{(p)} [(R_{1 \text{ опт}}^{(p)} + R_{\text{кор}}^{(p)})^2 + (X_1 + X_{\text{кор}}^{(p)})^2]}{R_{1 \text{ опт}}} \quad (5.102)$$

и

$$F_{\text{и мин}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн}}^{(p)} + G_{\text{ш а}}^{(p)} (R_{1 \text{ мин}}^{(p)} + R_{\text{кор}}^{(p)})^2}{R_{1 \text{ мин}}}. \quad (5.103)$$

Ступенчатое соединение шумящих четырехполюсников по своей структуре существенно отличается от других видов сложных соединений, что, в частности, отражается на решении вопросов его оптимизации, по критерию шумозащищенного сигнала.

Определим избыточный коэффициент шума части соединения, предположив, начинающийся с  $(s+1)$ -го четырехполюсника, учитывая при этом влияние шумов всех последующих ступеней. Учитывая (5.85)—(5.87), из (5.99) получим

$$F_{\text{и}}^{(\mu-s)(p)} = \frac{1}{R_1^{(s)(p)}} (R_{\text{шн}}^{(\mu-s)(p)} + G_{\text{ш а}}^{(\mu-s)(p)} |Z_1^{(s)(p)} + Z_{\text{кор}}^{(\mu-s)(p)}|^2), \quad (5.104)$$

где  $Z_1^{(s)(p)} = R_1^{(s)(p)} + i X_1^{(s)(p)}$  — нагрузка со стороны входа  $(s+1)$ -й ступени, равная выходному сопротивлению  $s$ -й ступени и учитывающая влияние предшествующих составляющих.

Согласование по шумам части соединения, начинающейся с  $(s+1)$ -го звена, при котором ее избыточный коэффициент шума принимает оптимальное значение, как следует из (5.100), достигается при

$$\begin{aligned}
R_{1 \text{ опт}}^{(s)(p)} &= \\
&= \left\{ \frac{R_{\text{шн}}^{(\mu-s)(s)} + G_{\text{ш а}}^{(\mu-s)(p)} [R_{\text{кор}}^{(\mu-s)(p)2} + (Z_1^{(s)(p)} + X_{\text{кор}}^{(\mu-s)(p)})^2]}{G_{\text{ш а}}^{(\mu-s)(p)}} \right\}^{1/2} = \\
&= \left( \frac{R_{\text{шн}}^{(\mu-s)(s)} + G_{\text{ш а}}^{(\mu-s)(p)} |i X_1^{(s)(p)} + Z_{\text{кор}}^{(\mu-s)(p)}|^2}{G_{\text{ш а}}^{(\mu-s)(p)}} \right)^{1/2} \quad (5.105)
\end{aligned}$$

и шумовое сопряжение, когда избыточный коэффициент шума имеет минимальное значение (5.101) при  $X_1^{(s)(p)} = -X_{\text{кор}}^{(\mu-s)(p)}$  и

$$R_{1 \text{ мин}}^{(s)(p)} = \left( \frac{R_{\text{шн}}^{(\mu-s)(p)} + G_{\text{ш а}}^{(\mu-s)(p)} R_{\text{кор}}^{(\mu-s)(p)}}{G_{\text{ш а}}^{(\mu-s)(p)}} \right)^{1/2} \quad (5.106)$$

На основании (5.105) и (5.106), согласно (5.102), запишем

$$\begin{aligned}
F_{\text{н опт}}^{(\mu-s)(p)} &= \frac{1}{R_{1 \text{ опт}}^{(s)(p)}} \{ R_{\text{шн}}^{(\mu-s)(p)} + G_{\text{ш а}}^{(\mu-s)(p)} [(R_{1 \text{ опт}}^{(s)(p)} + \\
&+ R_{\text{кор}}^{(\mu-s)(p)2} + (X_1^{(s)(p)} + X_{\text{кор}}^{(\mu-s)(p)})^2] \} \quad (5.107)
\end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned}
F_{\text{н мин}}^{(\mu-s)(p)} &= \frac{1}{R_{1 \text{ мин}}^{(s)(p)}} [R_{\text{шн}}^{(\mu-s)(p)} + G_{\text{ш а}}^{(\mu-s)(p)} (R_{1 \text{ мин}}^{(s)(p)} + \\
&+ R_{\text{кор}}^{(\mu-s)(p)2}] \quad (5.108)
\end{aligned}$$

Подобным же образом определяются условия согласования или сопряжения по шумам всех звеньев ступенчатого соединения шумящих четырехполосников.

## СОЕДИНЕНИЯ ДВУХ ШУМЯЩИХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

### 6.1. РАЗНОВИДНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ

Соединения двух шумящих четырехполюсников встречаются в виде различных сочетаний пассивных, активных элементов, либо тех и других вместе; к ним относятся усилительные каскады с корректорами и избирательными цепями, элементами питания, температурной стабилизации, местными обратными связями и т. д. [3, 45, 100].

Шумовые свойства усилительных устройств, за некоторыми исключениями, определяются входной цепью и первым каскадом. В этом случае достаточно рассчитать их показатели шума и тем самым избежать весьма сложных и трудоемких вычислений для полного соединения [49, 66].

Многие пассивные цепи также представляют собой соединения из двух четырехполюсников. В совокупности они обычно обладают лучшими функциональными показателями, чем каждый из элементов в отдельности, или же приобретают новые свойства, как, например, мостовые и перекрытые четырехполюсники [48, 55].

С развитием микроэлектроники возникло ряд новых проблем в части формирования цепей, в том числе касающихся осуществления уравновешенных бестрансформаторных соединений. Пути решения последних приводят к использованию последовательного соединения двух идентичных транзисторов [82].

### 6.2. СОЕДИНЕНИЯ НЕДЕЛИМЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

К неделимым четырехполюсникам до недавнего времени относились преимущественно активные элементы: электронные лампы и транзисторы. В результате успехов интегральной микротехнологии конструктивно неделимые стали выполняться не только активные функциональные узлы, вроде операционных усилителей, но и многие из пассивных цепей. При осуществлении их на налагах пассивных элементов, флуктуации которых пре-

вышают тепловые, определение шумовых показателей приобретает не менее важное (если не большее) значение, чем в активных цепях.

Шумовые и сигнальные параметры соединений двух неделимых четырехполюсников легко находятся из (5.1) — (5.87) подстановкой в них  $\mu=2$ . После несложных преобразований получим формулы первичных шумовых параметров всех основных видов соединений, которые сведены в табл. 6.1.

*Частный случай.* Соединение шумящего и бесшумного четырехполюсников. Одиночные элементы условимся считать бесшумными, если  $R_{шн} \rightarrow 0$  или  $G_{шн} \rightarrow 0$ <sup>1)</sup>. Условность понятия «бесшумный» элемент совершенно очевидна, но она весьма полезна в аспектах развития теории и для упрощения решения многих практических задач. Воспользовавшись данными табл. 6.1, найдем формулы шумовых параметров соединений шумящего и бесшумного неделимых четырехполюсников. Для этого в формулы общего вида подставим соответствующие значения шумовых параметров, имея в виду соединения:

— последовательное:  $R_{шн}^{(2)} = 0, G_{шн}^{(2)} = 0, Z_{кор}^{(2)} = Z_{11}^2$ ;

— параллельное:  $G_{шн}^{(2)} = 0, R_{шн}^{(2)} = 0, Y_{кор}^{(2)} = y_{11}^{(2)}$ ;

— последовательно-параллельное:  $R_{шн}^{(2)} = 0, G_{шн}^{(2)} = 0, Z_{кор}^{(2)} = h_{11}^{(2)}$ ;

— параллельно-последовательное:  $G_{шн}^{(2)} = 0; R_{шн}^{(2)} = 0, Y_{кор}^{(2)} = f_{11}^{(2)}$ ;

— ступенчатое:  $R_{шн}^{(1)} = 0, G_{шн}^{(1)} = 0, Z_{кор}^{(1)} = z_{11}$  или  $G_{шн}^{(1)} = 0, R_{шн}^{(1)} = 0, Y_{кор}^{(1)} = y_{11}$

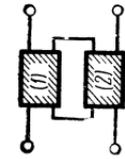
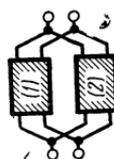
В ступенчатом соединении бесшумный четырехполюсник включен слева от шумящего. Такой вариант представляется наиболее интересным в практическом отношении, отображая включение пассивного четырехполюсника (бесшумной входной цепи) на входе активного (транзистора или электронной лампы). Рассматривается ступенчатое соединение при выражении сигнальных свойств бесшумного четырехполюсника в системах  $z$ - и  $y$ -параметров.

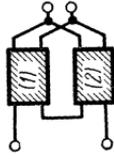
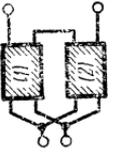
После подстановки в выражения табл. 6.1 параметров бесшумного четырехполюсника получим формулы всех пяти видов соединений, сведенные в табл. 6.2.

<sup>1)</sup> В данном случае и следующих за ним элементы электрических цепей рассматриваются как бесшумные, если

$$R_{шн}^{(1)} \gg R_{шн}^{(2)}, G_{шн}^{(1)} \gg G_{шн}^{(2)} \text{ или } G_{шн}^{(1)} \gg G_{шн}^{(2)}, R_{шн}^{(1)} \gg R_{шн}^{(2)}.$$

Таблица 6.1

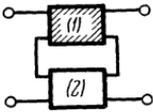
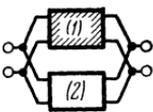
Тип цепи	Схема соединения	Пара-метр	Формулы результирующих шумовых параметров
$U-U$		$G_{\text{шa}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{шa}}^{(1)}  z_{21}^{(1)} ^2 + G_{\text{шa}}^{(2)}  z_{21}^{(2)} ^2}{ z_{21}^{(1)} + z_{21}^{(2)} ^2}$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(1)} + R_{\text{шн}}^{(2)} + \frac{G_{\text{шa}}^{(1)} G_{\text{шa}}^{(2)}  Z_{\text{коп}}^{(1)} - z_{21}^{(1)}   Z_{\text{коп}}^{(2)} - z_{21}^{(2)} - (Z_{\text{коп}}^{(2)} - z_{11}^{(2)}) z_{21}^{(1)} ^2}{G_{\text{шa}}^{(1)}  z_{21}^{(1)} ^2 + G_{\text{шa}}^{(2)}  z_{21}^{(2)} ^2}$
		$Z_{\text{коп}}^{(p)}$	$Z_{\text{коп}}^{(1)} + Z_{\text{коп}}^{(2)} + \frac{(G_{\text{шa}}^{(1)} z_{21}^{(1)*} - G_{\text{шa}}^{(2)} z_{21}^{(2)*}) [(Z_{\text{коп}}^{(1)} - z_{11}^{(1)}) z_{21}^{(2)} - (Z_{\text{коп}}^{(2)} - z_{11}^{(2)}) z_{21}^{(1)}]}{G_{\text{шa}}^{(1)}  z_{21}^{(1)} ^2 + G_{\text{шa}}^{(2)}  z_{21}^{(2)} ^2}$
$I-I$		$R_{\text{шa}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{шa}}^{(1)}  y_{21}^{(1)} ^2 + R_{\text{шa}}^{(2)}  y_{21}^{(2)} ^2}{ y_{21}^{(1)} + y_{21}^{(2)} ^2}$
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(1)} + G_{\text{шн}}^{(2)} + \frac{R_{\text{шa}}^{(1)} R_{\text{шa}}^{(2)}  Y_{\text{коп}}^{(1)} - y_{21}^{(1)}   Y_{\text{коп}}^{(2)} - y_{21}^{(2)} - (Y_{\text{коп}}^{(2)} - y_{11}^{(2)}) y_{21}^{(1)} ^2}{R_{\text{шa}}^{(1)}  y_{21}^{(1)} ^2 + R_{\text{шa}}^{(2)}  y_{21}^{(2)} ^2}$
		$Y_{\text{коп}}^{(p)}$	$Y_{\text{коп}}^{(1)} + Y_{\text{коп}}^{(2)} + \frac{(R_{\text{шa}}^{(1)} y_{21}^{(1)*} - R_{\text{шa}}^{(2)} y_{21}^{(2)*}) [(Y_{\text{коп}}^{(1)} - y_{11}^{(1)}) y_{21}^{(2)} - (Y_{\text{коп}}^{(2)} - y_{11}^{(2)}) y_{21}^{(1)}]}{R_{\text{шa}}^{(1)}  y_{21}^{(1)} ^2 + R_{\text{шa}}^{(2)}  y_{21}^{(2)} ^2}$

Тип цепи	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
<p style="text-align: center;"><math>U-I</math></p>		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ша}}^{(1)}  h_{21}^{(1)} ^2 + G_{\text{ша}}^{(2)}  h_{21}^{(2)} ^2}{ h_{21}^{(1)} + h_{21}^{(2)} ^2}$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(1)} + R_{\text{шн}}^{(2)} + \frac{G_{\text{ша}}^{(1)} G_{\text{ша}}^{(2)} [(Z_{\text{кор}}^{(1)} - h_{11}^{(1)}) h_{21}^{(2)} - (Z_{\text{кор}}^{(2)} - h_{11}^{(2)}) h_{21}^{(1)}]^2}{G_{\text{ша}}^{(1)}  h_{21}^{(1)} ^2 + G_{\text{ша}}^{(2)}  h_{21}^{(2)} ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_{\text{кор}}^{(1)} + Z_{\text{кор}}^{(2)} + \frac{(G_{\text{ша}}^{(1)} h_{21}^{(1)*} - G_{\text{ша}}^{(2)} h_{21}^{(2)*}) [(Z_{\text{кор}}^{(1)} - h_{11}^{(1)}) h_{21}^{(2)} - (Z_{\text{кор}}^{(2)} - h_{11}^{(2)}) h_{21}^{(1)}]}{G_{\text{ша}}^{(1)}  h_{21}^{(1)} ^2 + G_{\text{ша}}^{(2)}  h_{21}^{(2)} ^2}$
<p style="text-align: center;"><math>I-U</math></p>		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ша}}^{(1)}  f_{21}^{(1)} ^2 + R_{\text{ша}}^{(2)}  f_{21}^{(2)} ^2}{ f_{21}^{(1)} + f_{21}^{(2)} ^2}$
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(1)} + G_{\text{шн}}^{(2)} + \frac{R_{\text{ша}}^{(1)} R_{\text{ша}}^{(2)} [(Y_{\text{кор}}^{(1)} - f_{11}^{(1)}) f_{21}^{(2)} - (Y_{\text{кор}}^{(2)} - f_{11}^{(2)}) f_{21}^{(1)}]^2}{R_{\text{ша}}^{(1)}  f_{21}^{(1)} ^2 + R_{\text{ша}}^{(2)}  f_{21}^{(2)} ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_{\text{кор}}^{(1)} + Y_{\text{кор}}^{(2)} + \frac{(R_{\text{ша}}^{(1)} f_{21}^{(1)*} - R_{\text{ша}}^{(2)} f_{21}^{(2)*}) [(Y_{\text{кор}}^{(1)} - f_{11}^{(1)}) f_{21}^{(2)} - (Y_{\text{кор}}^{(2)} - f_{11}^{(2)}) f_{21}^{(1)}]}{R_{\text{ша}}^{(1)}  f_{21}^{(1)} ^2 + R_{\text{ша}}^{(2)}  f_{21}^{(2)} ^2}$

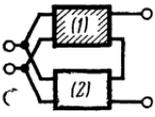
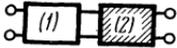
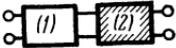
2\* Продолжение табл. 6.1

Тип цепи	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
<p style="text-align: center;"><math>A_z</math></p> 		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(1)} + R_{\text{шн}}^{(2)}  a_{21}^{(1)} ^2 + G_{\text{шн}}^{(2)}  a_{21}^{(2)} ^2 Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{22}^{(1)2}   \rightarrow$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(1)} R_{\text{шн}}^{(2)}  a_{11}^{(1)} - a_{21}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(1)} ^2 + G_{\text{шн}}^{(2)} R_{\text{шн}}^{(1)}  a_{11}^{(2)} - a_{12}^{(2)} a_{21}^{(1)} ^2   \rightarrow$ $G_{\text{шн}}^{(1)} +  a_{21}^{(1)} ^2 R_{\text{шн}}^{(2)} + G_{\text{шн}}^{(2)}  a_{21}^{(2)} ^2 Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{22}^{(1)2}   \rightarrow$ $\rightarrow + G_{\text{шн}}^{(1)} G_{\text{шн}}^{(2)}   (a_{11}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{12}^{(1)}) - (a_{21}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{22}^{(1)}) Z_{\text{кор}}^{(1)}  ^2$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(2)} a_{21}^{(1)*} (a_{11}^{(1)} - a_{21}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(1)}) + G_{\text{шн}}^{(2)} (a_{21}^{(1)*} Z_{\text{кор}}^{(2)*} + a_{22}^{(1)}) \times \rightarrow$ $G_{\text{шн}}^{(1)} +  a_{21}^{(1)} ^2 R_{\text{шн}}^{(2)} + G_{\text{шн}}^{(2)}  a_{21}^{(2)} ^2 Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{22}^{(1)2}   \rightarrow$ $\rightarrow \times [ (a_{11}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{12}^{(1)}) - (a_{21}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{22}^{(1)}) Z_{\text{кор}}^{(1)} ]$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(1)} + G_{\text{шн}}^{(2)}  a_{12}^{(1)} ^2 + R_{\text{шн}}^{(2)}  a_{11}^{(1)} + a_{12}^{(1)} Y_{\text{кор}}^{(2)} ^2$
<p style="text-align: center;"><math>A_y</math></p> 		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(1)} G_{\text{шн}}^{(2)}  a_{22}^{(1)} - a_{12}^{(1)} Y_{\text{кор}}^{(1)} ^2 + R_{\text{шн}}^{(2)} G_{\text{шн}}^{(1)}  a_{11}^{(1)} a_{22}^{(1)} - a_{12}^{(1)} a_{21}^{(1)} ^2   \rightarrow$ $R_{\text{шн}}^{(1)} + R_{\text{шн}}^{(2)}  a_{11}^{(1)} + a_{12}^{(1)} Y_{\text{кор}}^{(1)} ^2 + G_{\text{шн}}^{(2)}  a_{12}^{(1)} ^2$ $\rightarrow + R_{\text{шн}}^{(1)} R_{\text{шн}}^{(2)}   (a_{21}^{(1)} + a_{22}^{(1)} Y_{\text{кор}}^{(2)}) - (a_{11}^{(1)} + a_{12}^{(1)} Y_{\text{кор}}^{(1)}) Y_{\text{кор}}^{(1)}  ^2$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(2)} a_{12}^{(1)*} (a_{22}^{(1)} - a_{12}^{(1)} Y_{\text{кор}}^{(1)}) + R_{\text{шн}}^{(2)} (a_{11}^{(1)*} + a_{12}^{(1)*} Y_{\text{кор}}^{(1)}) \times \rightarrow$ $R_{\text{шн}}^{(1)} + R_{\text{шн}}^{(2)}  a_{11}^{(1)} + a_{12}^{(1)} Y_{\text{кор}}^{(1)} ^2 + G_{\text{шн}}^{(2)}  a_{12}^{(1)} ^2$ $\rightarrow \times [ (a_{21}^{(1)} + a_{22}^{(1)} Y_{\text{кор}}^{(2)}) - (a_{11}^{(1)} + a_{12}^{(1)} Y_{\text{кор}}^{(1)}) Y_{\text{кор}}^{(1)} ]$

Таблица 6.2

Тип цепи	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
U—U		$G_{ша}^{(p)}$	$G_{ша}^{(1)} \left  \frac{z_{21}^{(1)}}{z_{21}^{(1)} + z_{21}^{(2)}} \right ^2$
		$R_{шн}^{(p)}$	$R_{шн}^{(1)}$
		$Z_{кор}^{(p)}$	$Z_{кор}^{(1)} \left( 1 + \frac{z_{21}^{(2)}}{z_{21}^{(1)}} \right) -$ $- z_{11}^{(1)} \frac{z_{21}^{(2)}}{z_{21}^{(1)}} + z_{11}^{(2)}$
I—I		$R_{ша}^{(p)}$	$R_{ша}^{(1)} \left  \frac{y_{21}^{(1)}}{y_{21}^{(1)} + y_{12}^{(2)}} \right ^2$
		$G_{шн}^{(p)}$	$G_{шн}^{(1)}$
		$Y_{кор}^{(p)}$	$Y_{кор}^{(1)} \left( 1 + \frac{y_{21}^{(2)}}{y_{21}^{(1)}} \right) -$ $- y_{11}^{(1)} \frac{y_{21}^{(2)}}{y_{21}^{(1)}} + y_{11}^{(2)}$
U—I		$G_{ша}^{(p)}$	$G_{ша}^{(1)} \left  \frac{h_{21}^{(1)}}{h_{21}^{(1)} + h_{21}^{(2)}} \right ^2$
		$R_{шн}^{(p)}$	$R_{шн}^{(1)}$
		$Z_{кор}^{(p)}$	$Z_{кор}^{(1)} \left( 1 + \frac{h_{21}^{(2)}}{h_{21}^{(1)}} \right) -$ $- h_{11}^{(1)} \frac{h_{21}^{(2)}}{h_{21}^{(1)}} + h_{11}^{(2)}$

Продолжение табл. 6.2

Тип цепи	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
I—U		$R_{ша}^{(p)}$	$R_{ша}^{(1)} \left  \frac{h_{21}^{(1)}}{h_{21}^{(1)} + h_{21}^{(2)}} \right ^2$
		$G_{шн}^{(p)}$	$G_{шн}^{(1)}$
		$Y_{кор}^{(p)}$	$Y_{кор}^{(1)} \left( 1 + \frac{f_{21}^{(2)}}{f_{21}^{(1)}} \right) -$ $- f_{11}^{(1)} \frac{f_{21}^{(2)}}{f_{21}^{(1)}} + h_{11}^{(2)}$
Az		$G_{ша}^{(p)}$	$R_{шн}^{(2)}  a_{21}^{(1)} ^2 + G_{ша}^{(2)}  a_{21}^{(1)} Z_{кор}^{(2)} + a_{22}^{(1)} ^2$
		$R_{шн}^{(p)}$	$\frac{G_{ша}^{(2)} R_{шн}^{(2)}  \Delta a^{(1)} ^2}{R_{шн}^{(2)}  a_{21}^{(1)} ^2 + G_{ша}^{(2)}  a_{21}^{(1)} Z_{кор}^{(2)} + a_{22}^{(1)} ^2}$
		$Z_{кор}^{(p)}$	$\frac{R_{шн}^{(2)} a_{21}^{(1)*} a_{11}^{(1)*} + G_{ша}^{(2)} (a_{21}^{(1)} Z_{кор}^{(2)} + \rightarrow}{R_{шн}^{(2)}  a_{21}^{(1)} ^2 + G_{ша}^{(2)}  a_{21}^{(1)} Z_{кор}^{(2)} + a_{22}^{(1)} ^2}$ $\rightarrow + a_{22}^{(1)*} (a_{11}^{(1)} Z_{кор}^{(2)} + a_{12}^{(1)})$
Ay		$R_{ша}^{(p)}$	$G_{шн}^{(2)}  a_{12}^{(2)} ^2 + R_{ша}^{(2)}  a_{11}^{(1)} +$ $+ a_{12}^{(1)} Y_{кор}^{(2)} ^2$
		$G_{шн}^{(p)}$	$\frac{R_{ша}^{(2)} G_{шн}^{(2)}  \Delta a^{(1)} ^2}{G_{шн}^{(2)}  a_{12}^{(1)} ^2 + R_{ша}^{(2)}  a_{11}^{(1)} + a_{12}^{(1)} Y_{кор}^{(2)} ^2}$
		$Y_{кор}^{(p)}$	$\frac{G_{шн}^{(2)} a_{12}^{(1)*} a_{22}^{(1)} + R_{ша}^{(2)} (a_{11}^{(1)} + \rightarrow}{G_{шн}^{(2)}  a_{12}^{(1)} ^2 + R_{ша}^{(2)}  a_{11}^{(1)} + a_{12}^{(1)} Y_{кор}^{(2)} }$ $\rightarrow + a_{12}^{(1)} Y_{кор}^{(2)*} (a_{21}^{(1)} + a_{22}^{(1)} Y_{кор}^{(2)})$

### 6.3. СОЕДИНЕНИЯ СОСТАВНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Многие из широко применяемых сложных пассивных цепей с полным основанием можно рассматривать как соединения простых четырехполюсников. В таком подходе содержится возможность анализа шумовых свойств полиэлементных структур на основе полученных выше соотношений для шумовых показателей соединений простейших четырехполюсников. В подтверждение сказанному рассмотрим основные соединения составных шумящих четырехполюсников, используя в качестве примеров широко применяемые цепи.

*Последовательное соединение* (рис. 6.1а). Это соединение представляет хорошо известную перекрытую Т-об-

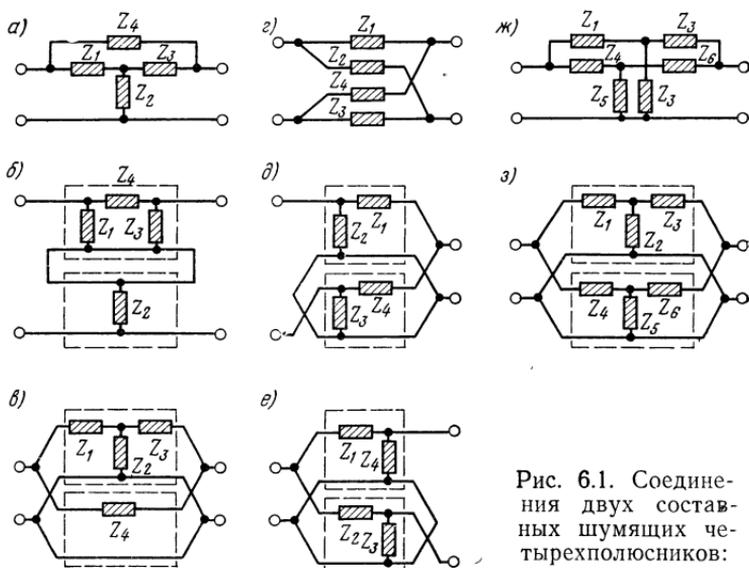


Рис. 6.1. Соединения двух составных шумящих четырехполюсников:

- а) перекрытая схема, б) в виде последовательного соединения, в) параллельного соединения, г) балансная (мостовая) схема, д) в виде последовательно-параллельного соединения, е) параллельно-последовательного, ж) двойная перекрытая схема, з) в виде параллельного соединения

разную схему. Образующие ее четырехполюсники (обведенные пунктиром) соединяются, как показано на рис. 6.10б. Эту же схему можно представить в виде параллельного соединения двух четырехполюсников (рис. 6.1в).

Для расчета шумовых параметров Т-образной перекрытой схемы воспользуемся формулами табл. П.5, из

которых находим сигнальные параметры трехэлементного четырехполюсника:  $y^{(1)_{11}} = [Y_1(Y_2 + Y_3)] / (Y_1 + Y_2 + Y_3)$ ,  $y^{(1)_{12}} = -Y_1 Y_3 / (Y_1 + Y_2 + Y_3)$ ,  $y^{(1)_{21}} = Y_1 Y_3 / (Y_1 + Y_2 + Y_3)$ ,  $y^{(1)_{22}} = -Y_3(Y_1 + Y_2) / (Y_1 + Y_2 + Y_3)$ , а из табл. П.4 определяем сигнальные параметры одноэлементного четырехполюсника:  $y^{(2)_{11}} = 1/Z_4$ ,  $y^{(2)_{12}} = -1/Z_4$ ,  $y^{(2)_{21}} = 1/Z_4$ ,  $y^{(2)_{22}} = -1/Z_4$ . Шумовые параметры этих четырехполюсников находим из табл. 4.4:

— для трехэлементного

$$R_{\text{шн}}^{(1)} = R_{\text{ш1}} + \frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}, \quad G_{\text{ш а}}^{(1)} = \frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}{|Z_2|^2}, \quad Z_{\text{кор}}^{(1)} = Z_1 + Z_2 \frac{R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}};$$

— для одноэлементного  $R^{(2)}_{\text{шн}} = R_{\text{ш4}}$ ,  $G^{(2)}_{\text{ш а}} = 0$ ,  $Z^{(2)}_{\text{кор}} = Z_4$ .

Далее, воспользовавшись пересчетными соотношениями (4.54) — (4.56), перейдем к шумовым параметрам  $G_{\text{шн}}^{(1)}$ ,  $R_{\text{ш а}}^{(1)}$ ,  $Y_{\text{кор}}^{(1)}$  и  $G_{\text{шн}}^{(2)}$ ,  $R_{\text{ш а}}^{(2)}$ ,  $Y_{\text{кор}}^{(2)}$  и после этого по формулам I—I табл. 6.1 определим результирующие шумовые параметры, приведенные для рассматриваемой схемы в табл. 6.3.

*Параллельное соединение.* Соединение двух составных T-образных четырехполюсников образует двойную перекрытую схему (рис. 6.1ж). Для определения шумовых параметров представим последнюю состоящей из двух четырехполюсников (рис. 6.1з), и, воспользовавшись табл. 4.4, найдем шумовые параметры первого и второго четырехполюсников:

$$R_{\text{шн}}^{(123)} = R_{\text{ш1}} + \frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}, \quad G_{\text{ш а}}^{(123)} = \frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}{|Z_2|^2}, \quad Z_{\text{кор}}^{(123)} = Z_1 + \frac{Z_2 R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}, \quad R_{\text{шн}}^{(456)} = R_{\text{ш4}} + \frac{R_{\text{ш5}} R_{\text{ш6}}}{R_{\text{ш5}} + R_{\text{ш6}}}, \\ G_{\text{ш а}}^{(456)} = \frac{R_{\text{ш5}} + R_{\text{ш6}}}{|Z_3|^2}, \quad Z_{\text{кор}}^{(456)} = Z_4 + \frac{Z_5 R_{\text{ш6}}}{R_{\text{ш5}} + R_{\text{ш6}}}.$$

По формулам преобразования (4.54) — (4.56) получим:

$$G_{\text{шн}}^{(123)}, R_{\text{ш а}}^{(123)}, Y_{\text{кор}}^{(123)} \text{ и } G_{\text{шн}}^{(456)}, R_{\text{ш а}}^{(456)}, Y_{\text{кор}}^{(456)}$$

и из табл. П.5 определим сигнальные параметры:

$$y_{11}^{(123)} = [Y_1(Y_2 + Y_3)] / (Y_1 + Y_2 + Y_3), \quad y_{12}^{(123)} = -Y_1 Y_3 / (Y_1 + Y_2 + Y_3), \\ y_{21}^{(123)} = Y_1 Y_3 / (Y_1 + Y_2 + Y_3), \quad y_{22}^{(123)} = -[Y_3(Y_1 + Y_2 + Y_3)] / (Y_1 + Y_2 + Y_3)$$

$$\begin{aligned}
 &+Y_2)]/(Y_1+Y_2+Y_3) \text{ и } y_{11}^{(456)} = [Y_4(Y_5+Y_6)]/(Y_4+Y_5+Y_6), \\
 &y_{12}^{(456)} = -Y_4Y_6/(Y_4+Y_5+Y_6), \quad y_{21}^{(456)} = Y_4Y_6/(Y_4+Y_5+Y_6), \\
 &y_{22}^{(456)} = -[Y_6(Y_4+Y_5)]/(Y_4+Y_5+Y_6).
 \end{aligned}$$

Подставив полученные значения в формулы I—I табл. 6.1, после несложных преобразований получим результирующие шумовые параметры двойной перекрытой Т-образной схемы, которые сведены в табл. 6.3.

*Последовательно-параллельное соединение* (рис. 6.1г). Соединение двух составных Г-образных четырехполюсников образует мостовую схему. Шумовые параметры ее найдем, предварительно определив из табл. 4.4 шумовые параметры первого и второго четырехполюсников:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{шн}}^{(12)} &= R_{\text{ш1}} R_{\text{ш2}}/(R_{\text{ш1}}+R_{\text{ш2}}), \quad G_{\text{ш а}}^{(12)} = (R_{\text{ш1}}+R_{\text{ш2}})/|Z_1|^2, \quad Z_{\text{коп}}^{(12)} = \\
 &= Z_1 R_{\text{ш2}}/(R_{\text{ш1}}+R_{\text{ш2}}); \quad R_{\text{шн}}^{(34)} = R_{\text{ш3}} R_{\text{ш4}}/(R_{\text{ш3}}+R_{\text{ш4}}), \quad G_{\text{ш а}}^{(34)} = \\
 &= (R_{\text{ш3}}+R_{\text{ш4}})/|Z_3|^2, \quad Z_{\text{коп}}^{(34)} = Z_3 R_{\text{ш4}}/(R_{\text{ш3}}+R_{\text{ш4}})
 \end{aligned}$$

и сигнальные параметры из табл. П.5:

$$\begin{aligned}
 h_{11}^{(12)} &= Z_1 Z_2/(Z_1+Z_2), \quad h_{12}^{(12)} = Z_2/(Z_1+Z_2), \quad h_{21}^{(12)} = Z_2/(Z_1+Z_2), \\
 h_{22}^{(12)} &= -1/(Z_1+Z_2) \text{ и } h_{11}^{(34)} = Z_3 Z_4/(Z_3+Z_4), \quad h_{12}^{(34)} = -Z_3/(Z_3+ \\
 &+Z_4), \quad h_{21}^{(34)} = -Z_3/(Z_3+Z_4), \quad h_{22}^{(34)} = -1/(Z_3+Z_4)
 \end{aligned}$$

(знаком минус перед  $h_{12}^{(34)}$  и  $h_{21}^{(34)}$  учитывается скрещивание левых выводов второго четырехполюсника).

Полученные параметры шумящих четырехполюсников затем подставим в выражения U—I табл. 6.1 и после преобразований находим результирующие шумовые параметры мостовой схемы, приведенные в табл. 6.3.

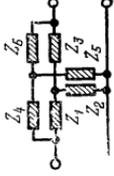
*Параллельно-последовательное соединение* (рис. 6.1г). Соединения обратных Г-образных четырехполюсников также приводит к мостовой схеме. Составные четырехполюсники в этом случае соединяются по схеме рис. 6.1е. Для них из табл. 4.6 находим шумовые параметры:

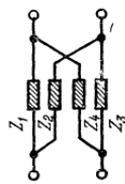
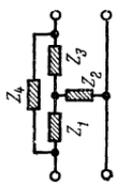
$$G_{\text{ш а}}^{(14)} = G_{\text{ш1}} G_{\text{ш4}}/(G_{\text{ш1}}+G_{\text{ш4}}), \quad R_{\text{ш а}}^{(14)} = (G_{\text{ш1}}+G_{\text{ш4}})/|Y_1|^2,$$

$$Y_{\text{коп}}^{(14)} = Y_1 \frac{G_{\text{ш4}}}{G_{\text{ш1}}+G_{\text{ш4}}} \text{ и } G_{\text{шн}}^{(23)} = G_{\text{ш2}} G_{\text{ш3}}/(G_{\text{ш2}}+G_{\text{ш3}}),$$

$$R_{\text{ш а}}^{(23)} = (G_{\text{ш2}}+G_{\text{ш3}})/|Y_2|^2, \quad Y_{\text{коп}} = Y_2 \frac{G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}}+G_{\text{ш3}}}$$

Таблица 6.3

Ш №	Схема четырехполюсника	Параметр	Формулы первичных шумовых параметров	Примечание
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{шн}}^{(123)}  Y_1 Y_3 Y_{456} ^2 + R_{\text{шн}}^{(456)}  Y_{123} Y_4 Y_6 ^2}{ Y_1 Y_3 Y_{456} + Y_{123} Y_4 Y_6 ^2}$	
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(123)} + G_{\text{шн}}^{(456)} + \frac{R_{\text{шн}}^{(123)} R_{\text{шн}}^{(456)}   (Y_{\text{кор}}^{(123)} Y_{123} - Y_1 Y_{23}) Y_4 Y_6 - \rightarrow  }{R_{\text{шн}}^{(123)}  Y_1 Y_3 Y_{456} ^2 + R_{\text{шн}}^{(456)}  Y_{123} Y_4 Y_6 ^2}$ $\rightarrow - \left( Y_{\text{кор}}^{(456)} Y_{456} - Y_4 Y_{456} \right)  Y_{13} ^2$	$Y_1 + Y_3 = Y_{12}$ $Y_2 + Y_3 = Y_{23}$ $Y_4 + Y_5 = Y_{45}$ $Y_5 + Y_6 = Y_{56}$ $Y_1 + Y_2 + Y_3 = Y_{123}$ $Y_4 + Y_5 + Y_6 = Y_{456}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_{\text{кор}}^{(123)} + Y_{\text{кор}}^{(456)} + \frac{[R_{\text{шн}}^{(123)} (Y_1 Y_3 Y_{456})^* - R_{\text{шн}}^{(456)} (Y_{123} Y_4 Y_6)^*] \times \rightarrow}{R_{\text{шн}}^{(123)}  Y_1 Y_3 Y_{456} ^2 + R_{\text{шн}}^{(456)}  Y_{123} Y_4 Y_6 ^2}$ $\rightarrow \times \left[ (Y_{\text{кор}}^{(123)} Y_{123} - Y_1 Y_{23}) Y_{46} - (Y_{\text{кор}}^{(456)} Y_{456} - Y_4 Y_{56}) Y_{13} \right]$	

№ пп.	Схема четырехполюсника	Параметр	Формулы первичных шумовых параметров	Примечание
2		$G_{\text{шд}}^{(p)}$ $R_{\text{шд}}^{(p)}$ $Z_{\text{кoп}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{шд}}^{(12)}   Z_2 Z_{34}  ^2 + G_{\text{шд}}^{(34)}   Z_{12} Z_3  ^2}{  Z_2 Z_{34} - Z_{12} Z_3  ^2}$ $R_{\text{шд}}^{(12)} + R_{\text{шд}}^{(34)} + \frac{G_{\text{шд}}^{(12)} G_{\text{шд}}^{(34)}   Z_{\text{кoп}}^{(12)} Z_1 Z_3 + Z_{\text{кoп}}^{(34)} Z_3 Z_2 - Z_2 Z_3 (Z_1 - Z_4)  ^2}{G_{\text{шд}}^{(12)}   Z_2 Z_{34}  ^2 + G_{\text{шд}}^{(34)}   Z_{12} Z_3  ^2}$ $Z_{\text{кoп}}^{(12)} + Z_{\text{кoп}}^{(34)} + \frac{[ G_{\text{шд}}^{(12)} (Z_2 Z_{34})^* + G_{\text{шд}}^{(34)} (Z_1 Z_3)^* ] \times \rightarrow}{G_{\text{шд}}^{(12)}   Z_2 Z_{34}  ^2 + G_{\text{шд}}^{(34)}   Z_{12} Z_3  ^2}$ $\rightarrow \times [ ( Z_{\text{кoп}}^{(12)} Z_{12} - Z_1 Z_2 ) ( - Z_3 ) - ( Z_{\text{кoп}}^{(34)} Z_{34} - Z_3 Z_4 ) Z_2 ]$	$Z_1 + Z_2 = Z_{12}$ $Z_3 + Z_4 = Z_{34}$
3		$R_{\text{шд}}^{(p)}$ $G_{\text{шд}}^{(p)}$ $Y_{\text{кoп}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{шд}}^{(123)}   Y_1 Y_3  ^2 + R_{\text{шд}}^{(4)}   Y_{123} Y_4  ^2}{  Y_1 Y_3 + Y_{123} Y_4  ^2}$ $G_{\text{шд}}^{(123)} + \frac{R_{\text{шд}}^{(123)} R_{\text{шд}}^{(2)}   ( Y_{\text{кoп}}^{(123)} Y_{123} - Y_1 Y_2 ) Y_4  ^2}{R_{\text{шд}}^{(123)}   Y_1 Y_3  ^2 + R_{\text{шд}}^{(4)}   Y_{123} Y_4  ^2}$ $Y_{\text{кoп}}^{(123)} + \frac{[ R_{\text{шд}}^{(123)} ( Y_1 Y_3 )^* - R_{\text{шд}}^{(4)} ( Y_{123} Y_4 )^* ] [ ( Y_{\text{кoп}}^{(123)} Y_{123} - Y_1 Y_2 ) Y_4 ]}{R_{\text{шд}}^{(123)}   Y_1 Y_3  ^2 + R_{\text{шд}}^{(4)}   Y_{123} Y_4  ^2}$	$Y_1 + Y_2 = Y_{12}$ $Y_2 + Y_3 = Y_{23}$ $Y_1 + Y_2 + Y_3 = Y_{123}$

и из табл. П.5 — сигнальные:

$$f_{11}^{(14)} = 1/(Z_1 + Z_4), f_{12}^{(14)} = Z_4/(Z_1 + Z_4), f_{21}^{(14)} = Z_4/(Z_1 + Z_4),$$

$$f_{22}^{(14)} = -Z_1 Z_4/(Z_1 + Z_4) \text{ и } f_{11}^{(23)} = 1/(Z_2 + Z_3),$$

$$f_{12}^{(23)} = -Z_3/(Z_2 + Z_3), f_{21}^{(23)} = -Z_3/(Z_2 + Z_3),$$

$$f_{22}^{(23)} = -Z_2 Z_3/(Z_2 + Z_3).$$

По формулам  $I-U$  табл. 6.1 далее определяются шумовые параметры всего соединения.

Таким же образом можно найти результирующие шумовые параметры и более сложных цепей, образованных из соединений составных четырехполюсников, удовлетворяющих условиям регулярности.

#### 6.4. СОЕДИНЕНИЯ НЕДЕЛИМЫХ И СОСТАВНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Из практических соображений в качестве неделимого возьмем шумящий четырехполюсник с общей стороной и ограничим число элементов в составном тремя. Это позволит без излишних усложнений рассмотреть соединения Т- и П-образных пассивных схем и неделимого четырехполюсника. В принципе, число элементов составного четырехполюсника может быть любым, но Т- и П-образные схемы находят исключительно широкое применение и часто встречаются в полиэлементных цепях в виде различного рода сочетаний.

Первичные шумовые параметры составных четырехполюсников приведены в табл. 4.4 и 4.7, используя их и соотношения табл. 6.1, найдем формулы результирующих шумовых параметров основных соединений неделимого и составного четырехполюсников.

*Последовательное соединение* (рис. 6.2а). Неделимый четырехполюсник характеризуется шумовыми и сигнальными параметрами:

$$R_{шн}^{(1)} = R_{шн}, G_{ш а}^{(1)} = G_{ш а}, Z_{кор}^{(1)} = Z_{кор}; z_{11}^{(1)} = z_{11}, z_{12}^{(1)} = z_{12},$$

$$z_{21}^{(1)} = z_{21}, z_{22}^{(1)} = z_{22}, \text{ а составной соответственно:}$$

$$R_{шн}^{(2)} = R_{ш1} + \frac{R_{ш2} R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}}, G_{ш а}^{(2)} = \frac{R_{ш2} + R_{ш3}}{|Z_2|^2}, Z_{кор}^{(2)} = Z_1 +$$

$$+ \frac{Z_2 R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}}, \text{ полученными из табл. 4.4, и } z_{11}^{(2)} = Z_1 + Z_2, z_{12}^{(2)} =$$

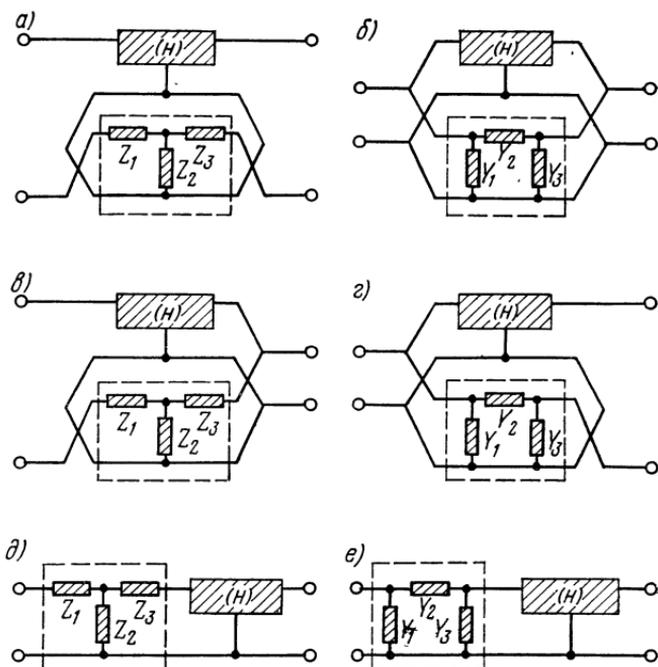


Рис. 6.2. Соединения неделимого и составного шумящих четырехполюсников: а) последовательное, б) параллельное, в) последовательно-параллельное, г) параллельно-последовательное, д), е) ступенчатое

$= -z_2$ ;  $z_{21}^{(2)} = z_2$ ;  $z_{22}^{(2)} = -(z_2 + z_3)$  согласно табл. П.5. Подставляя эти параметры в выражения  $U-U$  табл. 6.1, найдем формулы последовательного соединения, приведенные в группе 1 табл. 6.4.

*Параллельное соединение* (рис. 6.2б). Неделимый четырехполюсник характеризуется шумовыми и сигнальными параметрами:

$$G_{\text{шн}}^{(1)} = G_{\text{шн}}, \quad R_{\text{ш}a}^{(1)} = R_{\text{ш}a}, \quad Y_{\text{кор}}^{(1)} = Y_{\text{кор}}; \quad y_{11}^{(1)} = y_{11},$$

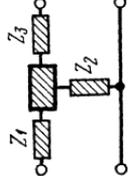
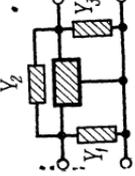
$$y_{12}^{(1)} = y_{12}, \quad y_{21}^{(1)} = y_{21}, \quad y_{22}^{(1)} = y_{22}.$$

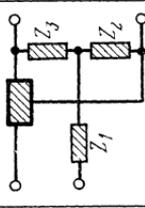
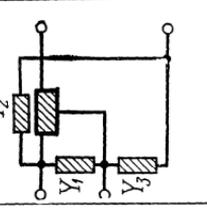
Для составного П-образного четырехполюсника находим в табл. 4.6 шумовые параметры:

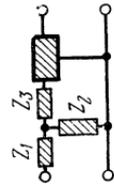
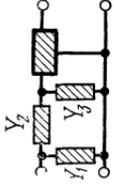
$$G_{\text{шн}}^{(2)} = G_{\text{ш}1} + \frac{G_{\text{ш}2} G_{\text{ш}3}}{G_{\text{ш}2} + G_{\text{ш}3}}, \quad R_{\text{ш}a}^{(2)} = \frac{G_{\text{ш}2} + G_{\text{ш}3}}{|Y_2|^2}, \quad Y_{\text{кор}}^{(2)} = Y_1 +$$

$$+ \frac{Y_2 G_{\text{ш}3}}{G_{\text{ш}2} + G_{\text{ш}3}}$$
 и в табл. П.5 — сигнальные:

Таблица 6.4

<p>Ш №</p> <p>Схема соединения</p>	<p>сигнальные</p>	<p>формулы результирующих параметров</p> <p>шумовые</p>
<p>1</p> 	$z_{11}^{(p)} = z_{11} + Z_1 + Z_2$ $z_{12}^{(p)} = z_{12} - Z_2$ $z_{21}^{(p)} = z_{21} + Z_2$ $z_{22}^{(p)} = z_{22} - (Z_2 + Z_3)$	$G_{шд}^{(p)} = \frac{G_{шд}  z_{21} ^2 + R_{ш2} + R_{ш3}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$ $R_{шн}^{(p)} = R_{шн} + R_{ш1} + \frac{R_{ш2} + R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}} \left[ \frac{R_{ш2} R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}} + \frac{G_{шд}  (Z_{кор} - z_{11})(R_{ш2} + R_{ш3}) + R_{ш2} z_{21} ^2}{G_{шд}  z_{21} ^2 + R_{ш2} + R_{ш3}} \right],$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_{кор} + Z_1 + \frac{R_{ш2} + R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}} - \left\{ \frac{Z_2 R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}} + \frac{[G_{шд} z_{21} Z_2 - (R_{ш2} + R_{ш3})] [(Z_{кор} - z_{11})(R_{ш2} + R_{ш3}) + R_{ш2} z_{21}]}{G_{шд}  z_{21} ^2 + (R_{ш2} + R_{ш3})} \right\}$
<p>2</p> 	$y_{11}^{(p)} = y_{11} + Y_1 + Y_2$ $y_{12}^{(p)} = y_{12} - Y_2$ $y_{21}^{(p)} = y_{21} + Y_2$ $y_{22}^{(p)} = y_{22} - (Y_2 + Y_3)$	$R_{шд}^{(p)} = \frac{R_{шд}  y_{21} ^2 + G_{ш2} + G_{ш3}}{ y_{21} + Y_2 ^2},$ $G_{шн}^{(p)} = G_{шн} + G_{ш1} + \frac{G_{ш2} + G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}} \left[ \frac{G_{ш2} G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}} + \frac{R_{шд}  (Y_{кор} - y_{11})(G_{ш2} + G_{ш3}) + G_{ш2} y_{21} ^2}{R_{шд}  y_{21} ^2 + G_{ш2} + G_{ш3}} \right],$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} + Y_1 + \frac{Y_2 G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}} - \left\{ \frac{Y_2 G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}} + \frac{[R_{шд} Y_2 y_{21} - (G_{ш2} + G_{ш3})] [(Y_{кор} - y_{11})(G_{ш2} + G_{ш3}) + G_{ш2} y_{21}]}{R_{шд}  y_{21} ^2 + G_{ш2} + G_{ш3}} \right\}$

№ ПЗ	Схема соединения	сигнальные	шумовые
3		$h_{11}^{(p)} = h_{11} + \frac{Z_1(Y_1 + Y_2 + Y_3)}{Y_2 + Y_3}$ $h_{12}^{(p)} = h_{12} - \frac{Y_3}{Y_2 + Y_3}$ $h_{21}^{(p)} = h_{21} - \frac{Y_3}{Y_2 + Y_3}$ $h_{22}^{(p)} = h_{22} - \frac{Y_2 Y_3}{Y_2 + Y_3}$	$G_{шa} = \frac{G_{шa}  h_{21}^*(Z_2 + Z_3) ^2 + (R_{ш2} + R_{ш3})}{ h_{21}(Z_2 + Z_3) - Z_2 ^2}$ $R_{шн}^{(p)} = R_{шн} + R_{ш1} + \frac{R_{ш2} + R_{ш3}}{(R_{ш2} + R_{ш3}) + (R_{ш3}Z_2 - R_{ш2}Z_3)h_{21}^2} + \frac{R_{ш2}R_{ш3}}{G_{шa}(Z_{кор} - h_{11})(R_{ш2} + R_{ш3}) + (R_{ш3}Z_2 - R_{ш2}Z_3)h_{21}^2}$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_{кор} + Z_1 + \frac{1}{\frac{G_{ш2}h_{21}^*(Z_2 + Z_3)^* + \rightarrow}{R_{ш2} + R_{ш3}} \left\{ Z_2 R_{ш3} - \frac{G_{шa}  h_{21}(Z_2 + \rightarrow}{(R_{ш2} + R_{ш3})} [(Z_{кор} - h_{11})(R_{ш2} + R_{ш3}) + (R_{ш3}Z_2 - R_{ш2}Z_3)h_{21}] \right\} \rightarrow + Z_3)^2 + (R_{ш2} + R_{ш3})}$
4		$f_{11}^{(p)} = f_{11} + \frac{Y_1(Z_1 + Z_2 + Z_3)}{Z_2 + Z_3}$ $f_{12}^{(p)} = f_{12} - \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3}$ $f_{21}^{(p)} = f_{21} - \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3}$ $f_{22}^{(p)} = f_{22} - \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}$	$R_{шa}^{(p)} = \frac{R_{шa}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + (G_{ш2} + G_{ш3})}{ f_{21}(Y_2 + Y_3) - Y_2 ^2}$ $G_{шн}^{(p)} = G_{шн} + G_{ш1} + \frac{G_{ш2} + G_{ш3}}{(G_{ш2} + G_{ш3}) - (G_{ш3}Y_2 - G_{ш2}Y_3)f_{21}^2} + \frac{G_{ш2}G_{ш3}}{R_{шa}   (Y_{кор} - f_{11})(G_{ш2} + G_{ш3}) - (G_{ш3}Y_2 - G_{ш2}Y_3) f_{21}^2  }$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} + Y_1 + \frac{1}{\frac{R_{шa}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + (G_{ш2} + G_{ш3})}{G_{ш2} + G_{ш3}} \left\{ Y_2 G_{ш3} - \frac{R_{шa}  f_{21}(Y_2 + \rightarrow}{(G_{ш2} + G_{ш3})} [(Y_{кор} - f_{11})(G_{ш2} + G_{ш3}) + (G_{ш3}Y_2 - Y_3 G_{ш2}) f_{21}] \right\} \rightarrow + Y_3)^2 + (G_{ш2} + G_{ш3})}$

№ п/п	Схема соединения	сигнальные	формулы результирующих параметров	шумовые
5		$a_{11}^{(p)} = \frac{1}{z_{21}} [(1 + Z_1 Y_2) z_{11} + Z_1 (1 + Y_2 Z_3) + Z_3]$ $a_{12}^{(p)} = -\frac{z_{21}}{1} \{ (1 + Z_1 Y_2) \Delta z + [Z_1 (1 + Y_2 Z_3) + Z_3] z_{22} \}$ $a_{21}^{(p)} = -\frac{1}{z_{21}} [1 + Y_2 (z_{11} + z_{21} Z_3)]$ $a_{22}^{(p)} = -\frac{1}{z_{21}} [Y_2 \Delta z + (1 + Y_2 Z_3) z_{22}]$	$G_{ш\alpha}^{(p)} = \frac{R_{ш2} + R_{ш3} + R_{шн} + G_{ш\alpha}   Z_{кор} + Z_2 + Z_3  ^2}{  Z_2  ^2}$ $R_{шн}^{(p)} = R_{ш1} + \frac{1}{R_{ш2} + R_{ш3}} \left\{ R_{ш2} R_{ш3} + R_{шн} [ R_{ш2}^2 + G_{ш\alpha} (R_{ш2} + R_{ш3})   Z_{21}  ^2 ] + G_{ш\alpha}   R_{ш2} (Z_{кор} + Z_3) - R_{ш3} Z_{21}  ^2 \right\}$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_1 + \frac{R_{ш2} + R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}} \left\{ R_{ш3} + R_{шн} R_{ш2} + G_{ш\alpha} ( Z_{кор}^* + Z_2 + Z_3 ) [ R_{ш2} ( Z_{кор} + Z_3 ) - Z_2 R_{ш3} ] \right\}$	
6		$a_{11}^{(p)} = -\frac{1}{y_{21}} [ Z_2 \Delta y + (1 + Z_2 Y_3) y_{22} ]$ $a_{12}^{(p)} = -\frac{1}{y_{21}} [ 1 + Z_3 \times (y_{21} + Y_3) ]$ $a_{21}^{(p)} = -\frac{1}{y_{21}} \{ (1 + Y_1 Z_2) \times \Delta y + [ Y_1 (1 + Z_2 Y_3) + Y_3 ] y_{22} \}$ $a_{22}^{(p)} = \frac{1}{y_{21}} [ (1 + Y_1 Z_2) \times (y_{21} + Y_3) + Y_1 (1 + Z_2 Y_3) + Y_3 ]$	$R_{ш\alpha}^{(p)} = \frac{G_{ш2} + G_{ш3} + G_{шн} + R_{ш\alpha}   Y_2 + Y_3 + Y_{кор}  ^2}{  Y_2  ^2}$ $G_{шн}^{(p)} = G_{ш1} + \frac{1}{G_{ш2} + G_{ш3}} \left\{ G_{ш2} G_{ш3} + G_{шн} [ G_{ш2}^2 + R_{ш\alpha} (G_{ш2} + G_{ш3})   Y_2  ^2 ] +   R_{ш\alpha} G_{ш2} (Y_{кор} + Y_3) - G_{ш3} Y_2  ^2 \right\}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_1 + \frac{G_{ш2} + G_{ш3}}{Y_2} \left\{ G_{ш3} + G_{шн} R_{ш2} + R_{ш\alpha} ( Y_{кор}^* + Y_2 + Y_3 ) [ G_{ш2} ( Y_{кор} + Y_3 ) - Y_2 G_{ш3} ] \right\}$	

Примечание. В табл. 6.4; 6.5; 6.6; 6.7; 6.8; 6.9; 6.10; 6.11 сигнальные параметры одинаковы.

$$y_{11}^{(2)} = Y_1 + Y_2, \quad y_{12}^{(2)} = -Y_2, \quad y_{21}^{(2)} = Y_2 \text{ и } y_{22}^{(2)} = -(Y_2 + Y_3).$$

Подставив в выражения  $I-I$  табл. 6.1 приведенные параметры, получим результирующие параметры соединения шумящих четырехполюсников, которые сведены группу 2 табл. 6.4.

*Последовательно-параллельное соединение* (рис. 6.2в). Неделимый четырехполюсник характеризуется шумовыми и сигнальными параметрами:

$$R_{\text{шн}}^{(1)} = R_{\text{шн}}, \quad G_{\text{ш}a}^{(1)} = G_{\text{ш}a}, \quad Z_{\text{кор}}^{(1)} = Z_{\text{кор}}; \quad h_{11}^{(1)} = h_{11}, \quad h_{12}^{(1)} = h_{12}, \\ h_{21}^{(1)} = h_{21}, \quad h_{22}^{(1)} = h_{22}.$$

Составной Т-образный четырехполюсник характеризуется шумовыми параметрами:

$$R_{\text{шн}}^{(2)} = R_{\text{ш1}} + \frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}, \quad G_{\text{ш}a}^{(2)} = \frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}{|Z_2|^2}, \quad Z_{\text{кор}} = Z_1 + \frac{Z_2 R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}},$$

определяемыми из табл. 4.4, и сигнальными:

$$h_{11}^{(2)} = [Z_1(Y_1 + Y_2 + Y_3)] / (Y_2 + Y_3), \quad h_{12}^{(2)} = Y_3 / (Y_2 + Y_3), \\ h_{21}^{(2)} = Y_3 / (Y_2 + Y_3), \quad h_{22}^{(2)} = -Y_2 Y_3 / (Y_2 + Y_3),$$

получаемыми из табл. П.5. Подставив в выражения  $U-U$  табл. 6.1 найденные показатели, определим результирующие параметры соединения, которые сведены в группу 3 табл. 6.4.

*Параллельно-последовательное соединение* (рис. 6.2г). Неделимый четырехполюсник задан шумовыми и сигнальными параметрами:

$$G_{\text{шн}}^{(1)} = G_{\text{шн}}, \quad R_{\text{ш}a}^{(1)} = R_{\text{ш}a}, \quad Y_{\text{кор}}^{(1)} = Y_{\text{кор}}; \\ f_{11}^{(1)} = f_{11}, \quad f_{12}^{(1)} = f_{12}, \quad f_{21}^{(1)} = f_{21}, \quad f_{22}^{(1)} = f_{22}.$$

Составной четырехполюсник представим шумовыми параметрами, определяемыми из табл. 4.6:

$$G_{\text{шн}}^{(2)} = G_{\text{ш1}} + \frac{G_{\text{ш2}} G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}, \quad R_{\text{ш}a}^{(2)} = \frac{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}{|Y_2|^2}, \quad Y_{\text{кор}}^{(2)} = Y_1 + \frac{Y_2 G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$$

и сигнальными, получаемыми из табл. П.5:

$$f_{11}^{(2)} = [Y_1(Z_1 + Z_2 + Z_3)] / (Z_2 + Z_3), \quad f_{12}^{(2)} = Z_3 / (Z_2 + Z_3), \\ f_{21}^{(2)} = Z_3 / (Z_2 + Z_3), \quad f_{22}^{(2)} = -Z_2 Z_3 / (Z_2 + Z_3);$$

Подставив параметры неделимого и составного четырехполюсников в группу  $I-U$  табл. 6.1, получим результи-

рующие параметры соединения, которые сведены в группу 4 табл. 6.4.

*Ступенчатое соединение* (рис. 6.2д и 6.2е). В первом случае к неделимому четырехполюснику слева подключен Т-образный составной четырехполюсник, во втором П-образный. Т-образный четырехполюсник характеризуется шумовыми параметрами:

$$R_{\text{шн}}^{(1)} = R_{\text{ш1}} + \frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}, G_{\text{ш}a}^{(1)} = \frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{|Z_2|^2}, Z_{\text{кор}}^{(1)} = Z_1 + \frac{Z_2 R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}$$

и сигнальными, определяемыми из табл. П.5:

$$a_{11}^{(1)} = 1 + Z_1 Y_2, a_{12}^{(1)} = Z_1 + Z_3 + Z_1 Y_1 Z_3, a_{21}^{(1)} = Y_2, \\ a_{22}^{(1)} = 1 + Y_2 Z_3;$$

П-образный четырехполюсник имеет параметры шумовые;

$$G_{\text{шн}}^{(1)} = G_{\text{ш1}} + \frac{G_{\text{ш2}} G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}, R_{\text{ш}a}^{(1)} = \frac{G_{\text{ш}a} + G_{\text{ш3}}}{|Y_2|^2},$$

$$Y_{\text{кор}}^{(1)} = Y_1 + Y_2 \frac{G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$$

и сигнальные, определяемые из табл. П. 5:

$$a_{11}^{(1)} = 1 + Z_2 Y_2, a_{12}^{(1)} = Z_2, a_{21}^{(1)} = Y_1 + Y_2 + Y_1 Z_2 Y_3, \\ a_{22}^{(1)} = 1 + Y_2 Z_2.$$

Для неделимого четырехполюсника в первом случае выбираем шумовые параметры:

$$R_{\text{шн}}^{(2)} = R_{\text{шн}}, G_{\text{ш}a}^{(2)} = G_{\text{ш}a}, Z_{\text{кор}}^{(2)} = Z_{\text{кор}};$$

во втором:

$$G_{\text{шн}}^{(2)} = G_{\text{шн}}, R_{\text{ш}a}^{(2)} = R_{\text{ш}a}, Y_{\text{кор}}^{(2)} = Y_{\text{кор}}$$

и одинаковые сигнальные параметры:

$$a_{11}^{(2)} = a_{11}, a_{12}^{(2)} = a_{12}, a_{21}^{(2)} = a_{21}, a_{22}^{(2)} = a_{22}.$$

Подставляя полученные параметры составного и неделимого четырехполюсников соответственно в выражения  $A_z A_y$  табл. 6.1, после несложных преобразований получим формулы результирующих шумовых параметров, которые помещены в группы 5 и 6 табл. 6.4.

*Граничный случай 1.* Составной четырехполюсник не содержит источников внутренних флуктуаций.

Шумовые параметры составного Т-образного четырехполюсника в этом случае  $R_{\text{шн}}^{(1)} = 0$ ,  $G_{\text{ша}}^{(1)} = 0$ ,  $Z_{\text{кор}}^{(1)} = z_{11}$  и П-образного —  $G_{\text{шн}}^{(1)} = 0$ ,  $R_{\text{ша}}^{(1)} = 0$ ,  $Y_{\text{кор}}^{(1)} = y_{11}$ , при последовательно-параллельном соединении  $Z_{\text{кор}}^{(1)} = h_{11}$  и параллельно-последовательном  $Y_{\text{кор}}^{(1)} = f_{11}$ .

Формулы результирующих шумовых параметров при бесшумном составном четырехполюснике находим из соответствующих выражений табл. 6.2, эти формулы сведены в табл. 6.11.

*Граничный случай 2.* Неделимый четырехполюсник не содержит источников внутренних флуктуаций.

Подобно предыдущему определим шумовые параметры бесшумных неделимых Т-образного четырехполюсника  $R_{\text{шн}}^{(2)} = 0$ ,  $G_{\text{ша}}^{(2)} = 0$ ,  $Z_{\text{кор}}^{(2)} = z_{11}$  и П-образного  $G_{\text{шн}}^{(2)} = 0$ ,  $R_{\text{ша}}^{(2)} = 0$ ,  $Y_{\text{кор}}^{(2)} = y_{11}$ . При последовательно-параллельном соединении  $Z_{\text{кор}}^{(2)} = h_{11}$  и параллельно-последовательном —  $Y_{\text{кор}}^{(2)} = f_{11}$ .

Шумовые параметры этого вида соединений находим подстановкой соответствующих значений в выражения табл. 6.2, полученные формулы сведены в табл. 6.29.

*Частные случаи.* Один или несколько элементов составного четырехполюсника не содержат источников внутренних флуктуаций.

Возможные случаи сводятся к следующим сочетаниям, приведенным в соединениях общего вида табл. 4.5 и 4.7:

а)  $R_{\text{ш1}} = 0$ ,  $G_{\text{ш1}} = 0$ , но  $Z_1 \neq 0$  и  $Y_1 \neq 0$  — шумовые параметры составного четырехполюсника определяются по формулам 2 и всего соединения сведены в табл. 6.5;

б)  $R_{\text{ш2}} = 0$ ,  $G_{\text{ш2}} = 0$ , но  $Z_2 \neq 0$  и  $Y_2 \neq 0$  — шумовые параметры составного четырехполюсника определяются по формулам 1 и всего соединения сведены в табл. 6.6;

в)  $R_{\text{ш3}} = 0$ ,  $G_{\text{ш3}} = 0$ , но  $Z_3 \neq 0$  и  $Y_3 \neq 0$  — шумовые параметры составного четырехполюсника определяются по формулам 3 и всего соединения сведены в табл. 6.7;

г)  $R_{\text{ш1}} = 0$  и  $R_{\text{ш2}} = 0$ ,  $G_{\text{ш1}} = 0$  и  $G_{\text{ш2}} = 0$ , но  $Z_1 \neq 0$  и  $Z_2 \neq 0$ ,  $Y_1 \neq 0$  и  $Y_2 \neq 0$  — шумовые параметры составного четырехполюсника определяются по формулам 5 и всего соединения сведены в табл. 6.8;

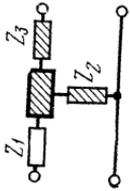
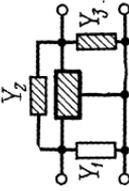
д)  $R_{\text{ш2}} = 0$  и  $R_{\text{ш3}} = 0$ ,  $G_{\text{ш2}} = 0$  и  $G_{\text{ш3}} = 0$ , но  $Z_2 \neq 0$  и  $Z_3 \neq 0$ ,  $Y_1 \neq 0$  и  $Y_3 \neq 0$  — шумовые параметры составного четырехполюсника определяются по формулам 4 и всего соединения сведены в табл. 6.9;

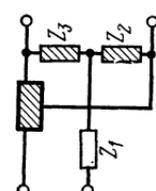
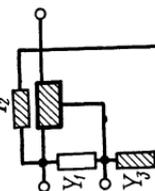
е)  $R_{\text{ш1}} = 0$  и  $R_{\text{ш3}} = 0$ ,  $G_{\text{ш1}} = 0$  и  $G_{\text{ш3}} = 0$ , но  $Z_1 \neq 0$  и  $Z_3 \neq 0$ ,  $Y_2 \neq 0$  и  $Y_3 \neq 0$  — шумовые параметры составного четырехполюсника определяются по формулам 6 и всего соединения сведены в табл. 6.10.

Для той же последовательности сочетаний шумящих и бесшумных элементов в составном четырехполюснике, но при бесшумном неделимом четырехполюснике найдены результирующие шумовые параметры всех видов соединений, которые помещены в табл. 6.30—6.35.

Помимо рассмотренных выше сочетаний составного и неделимого четырехполюсников встречаются также соединения, в которых составной четырехполюсник образуется не тремя, а одним или двумя двухполюсниками. Такие цепи удобно рассматривать как частные случаи соединения трехэлементного составного и неделимого четырехполюсников. Полученные таким образом формулы шумовых параметров приведены в табл. 6.12—6.28 и 6.37—6.49.

Таблица 6.5

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}a}  z_{21} ^2 + R_{\text{шн}2} + R_{\text{шн}3}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}1} + \frac{1}{R_{\text{шн}2} + R_{\text{шн}3}} \left[ R_{\text{шн}2} R_{\text{шн}3} + \frac{G_{\text{шн}a}  (Z_{\text{кор}} - z_{11})(R_{\text{шн}2} + R_{\text{шн}3}) + R_{\text{шн}2} z_{21} ^2}{G_{\text{шн}a}  z_{21} ^2 + (R_{\text{шн}2} + R_{\text{шн}3})} \right]$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + \frac{1}{R_{\text{шн}2} + R_{\text{шн}3}} \left\{ Z_2 R_{\text{шн}3} + \frac{[G_{\text{шн}a} z_{21} Z_2 - (R_{\text{шн}2} + R_{\text{шн}3})] [(Z_{\text{кор}} - z_{11})(R_{\text{шн}2} + R_{\text{шн}3}) + R_{\text{шн}2} z_{21}]}{G_{\text{шн}a}  z_{21} ^2 + (R_{\text{шн}2} + R_{\text{шн}3})} \right\}$
2		$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн}a}  y_{21} ^2 + G_{\text{шн}2} + G_{\text{шн}3}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}1} + \frac{1}{G_{\text{шн}2} + G_{\text{шн}3}} \left[ G_{\text{шн}2} G_{\text{шн}3} + \frac{R_{\text{шн}a}  (Y_{\text{кор}} - y_{11})(G_{\text{шн}2} + G_{\text{шн}3}) + G_{\text{шн}2} y_{21} ^2}{R_{\text{шн}a}  y_{21} ^2 + G_{\text{шн}2} + G_{\text{шн}3}} \right]$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 + \frac{1}{G_{\text{шн}2} + G_{\text{шн}3}} \left\{ Y_2 G_{\text{шн}3} + \frac{[R_{\text{шн}a} Y_2 y_{21} - (G_{\text{шн}2} + G_{\text{шн}3})] [(Y_{\text{кор}} - y_{11})(G_{\text{шн}2} + G_{\text{шн}3}) + G_{\text{шн}2} y_{21}]}{R_{\text{шн}a}  y_{21} ^2 + G_{\text{шн}2} + G_{\text{шн}3}} \right\}$

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
3		$G_{шa}^{(p)} = \frac{G_{шa}  h_{21}(Z_2 + Z_3) ^2 + R_{ш2} + R_{ш3}}{ h_{21}(Z_2 + Z_3) - Z_2 ^2}$ $R_{шн}^{(p)} = R_{шн} + \frac{R_{ш2}R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}} \left[ R_{ш2}R_{ш3} + \frac{G_{шa}  h_{21}(Z_2 + Z_3) ^2 + (Z_2R_{ш3} - Z_3R_{ш2})h_{21} ^2}{G_{шa}  h_{21}(Z_2 + Z_3) ^2 + R_{ш2} + R_{ш3}} \right]$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_{кор} + Z_1 + \frac{R_{ш2} + R_{ш3}}{1} \left\{ \frac{Z_2R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}} - \frac{[G_{шa}h_{21}^*(Z_2 + Z_3)Z_2 + (R_{ш2} + R_{ш3})][(Z_{кор} - h_{11})(R_{ш2} + R_{ш3}) + (Z_2R_{ш3} - Z_3R_{ш2})h_{21}]}{G_{шa}  h_{21}(Z_2 + Z_3) ^2 + R_{ш2} + R_{ш3}} \right\}$
4		$R_{шa}^{(p)} = \frac{R_{шa}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{ш2} + G_{ш3}}{ f_{21}(Y_2 + Y_3) - Y_2 ^2}$ $G_{шн}^{(p)} = G_{шн} + \frac{G_{ш2}G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}} \left[ G_{ш2}G_{ш3} + \frac{R_{шa}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{ш2} + G_{ш3}}{Y_2G_{ш3} - Y_3G_{ш2}} f_{21} ^2 \right]$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} + Y_1 + \frac{1}{G_{ш2} + G_{ш3}} \left\{ \frac{Y_2G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}} - \frac{[R_{шa}f_{21}^*(Y_2 + Y_3)Y_2 + (G_{ш2} + G_{ш3})][(Y_{кор} - f_{11})(G_{ш2} + G_{ш3}) + (Y_2G_{ш3} - Y_3G_{ш2})f_{21}]}{R_{шa}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{ш2} + G_{ш3}} \right\}$

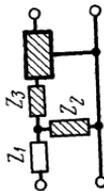
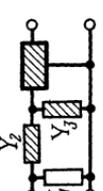
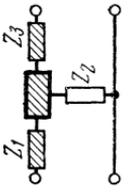
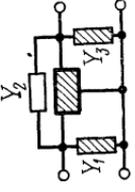
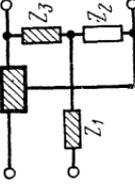
№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
5		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}} + R_{\text{шн}} + G_{\text{шд}}   Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}}  ^2}{  Z_2  ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{1}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}} \left\{ R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}} + R_{\text{шн}} [ R_{\text{ш2}}^2 + G_{\text{шд}} (R_{\text{ш2}} + P_{\text{ш3}})   Z_2  ^2 ] + G_{\text{шд}}   R_{\text{ш2}} (Z_3 + Z_{\text{кор}}) - R_{\text{ш3}} Z_2  ^2 \right\}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + \frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}} + R_{\text{шн}} + G_{\text{шд}}   Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}}  ^2} \left\{ R_{\text{ш3}} + R_{\text{ш2}} R_{\text{шн}} + G_{\text{шд}} (Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}}) [ R_{\text{ш2}} (Z_3 + Z_{\text{кор}}) - Z_2 R_{\text{ш3}} ] \right\}$
6		$R_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}} + G_{\text{шн}} + R_{\text{шд}}   Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}}  ^2}{  Y_2  ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{1}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}} \left\{ G_{\text{ш2}} G_{\text{ш3}} + G_{\text{шн}} [ G_{\text{ш2}}^2 + R_{\text{шд}} (G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}})   Y_2  ^2 ] + R_{\text{шд}}   G_{\text{ш2}} (Y_3 + Y_{\text{кор}}) - G_{\text{ш3}} Y_2  ^2 \right\}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + \frac{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}{G_{\text{шн}} + G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}} + R_{\text{шд}}   Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}}  ^2} \left\{ G_{\text{ш3}} + G_{\text{шн}} G_{\text{ш2}} + R_{\text{шд}} (Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}}) [ G_{\text{ш2}} (Y_3 + Y_{\text{кор}}) - Y_2 G_{\text{ш3}} ] \right\}$

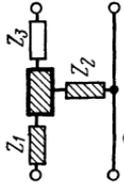
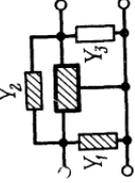
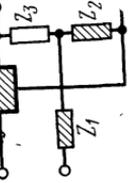
Таблица 6.6

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шд}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шз}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$ $R_{\text{шп}}^{(p)} = R_{\text{шп}} + R_{\text{шп}} + \frac{G_{\text{шд}} R_{\text{шз}}  Z_{\text{кор}} - z_{11} ^2}{G_{\text{шд}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шз}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + Z_2 + \frac{(G_{\text{шд}} z_{21}^* Z_2 - R_3) (Z_{\text{кор}} - z_{11})}{G_{\text{шд}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шз}}}$
2		$R_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шд}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шз}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$ $G_{\text{шп}}^{(p)} = G_{\text{шп}} + G_{\text{шп}} + \frac{R_{\text{шд}} G_{\text{шз}}  Y_{\text{кор}} - y_{11} ^2}{R_{\text{шд}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шз}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 + Y_2 + \frac{(R_{\text{шд}} Y_2 y_{21}^* - G_{\text{шз}}) (Y_{\text{кор}} - y_{11})}{R_{\text{шд}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шз}}}$
3		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шд}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шз}}}{ h_{21} (Z_2 + Z_3) - Z_2 ^2}$ $R_{\text{шп}}^{(p)} = R_{\text{шп}} + R_{\text{шп}} + \frac{G_{\text{шд}} R_{\text{шз}}  Z_{\text{кор}} - h_{11} + Z_2 h_{21} ^2}{G_{\text{шд}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шз}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + Z_2 - \frac{[G_{\text{шд}} h_{21}^* (Z_2 + Z_3)^* Z_2 + R_{\text{шз}}] (Z_{\text{кор}} - h_{11} + Z_2 h_{21})}{G_{\text{шд}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шз}}}$

Продолжение табл. 6.6

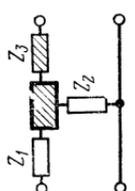
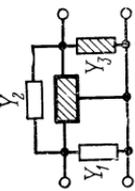
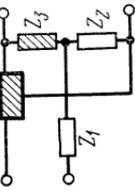
№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
4		$R_{шз}^{(p)} = \frac{R_{шз}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{шз}}{ f_{21}(Y_2 + Y_3) - Y_2 ^2}$ $G_{шн}^{(p)} = G_{шн} + G_{ш1} + \frac{R_{шз} G_{шз}  Y_{кор} - f_{11} + Y_3 f_{21} ^2}{R_{шз}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{шз}}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} + Y_1 + Y_2 - \frac{[R_{шз} f_{21}^* (Y_2 + Y_3)^* Y_2 + G_{шз}] (Y_{кор} - f_{11} + Y_2 f_{21})}{R_{шз}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{шз}}$
5		$G_{шз}^{(p)} = \frac{R_{шз} + R_{шн} + G_{шз}  Z_2 + Z_3 + Z_{кор} ^2}{ Z_2 ^2}$ $R_{шн}^{(p)} = R_{шн} + \frac{G_{шз}  Z_2 ^2 (R_{шн} + R_{шз})}{R_{шз} + R_{шн} + G_{шз}  Z_2 + Z_3 + Z_{кор} ^2}$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_1 + Z_2 - \frac{G_{шз} (Z_2 + Z_3 + Z_{кор})^* Z_2^2}{R_{шз} + R_{шн} + G_{шз}  Z_2 + Z_3 + Z_{кор} ^2}$
6		$R_{шз}^{(p)} = \frac{G_{шз} + G_{шн} + R_{шз}  Y_2 + Y_3 + Y_{кор} ^2}{ Y_2 ^2}$ $G_{шн}^{(p)} = G_{шн} + \frac{R_{шз}  Y_2 ^2 (G_{шн} + G_{шз})}{G_{шз} + G_{шн} + R_{шз}  Y_2 + Y_3 + Y_{кор} ^2}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_1 + Y_2 - \frac{R_{шз} Y_2^2 (Y_2 + Y_3 + Y_{кор})^*}{G_{шз} + G_{шн} + R_{шз}  Y_2 + Y_3 + Y_{кор} ^2}$

Таблица 6.7

№ пп	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шдд}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шд2}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$ $R_{\text{шш}}^{(p)} = R_{\text{шш1}} + R_{\text{шш2}} + \frac{G_{\text{шдд}} R_{\text{шд2}}  Z_{\text{кор}} - z_{11} + z_{21} ^2}{G_{\text{шдд}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шд2}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + \frac{(G_{\text{шдд}}^* Z_2 - R_{\text{шд2}}) (Z_{\text{кор}} - z_{11} + z_{21})}{G_{\text{шдд}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шд2}}}$
2		$R_{\text{шдд}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шдд}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шд2}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$ $G_{\text{шш}}^{(p)} = G_{\text{шш1}} + G_{\text{шш2}} + \frac{R_{\text{шдд}} G_{\text{шд2}}  Y_{\text{кор}} - y_{11} + y_{21} ^2}{R_{\text{шдд}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шд2}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 + \frac{(R_{\text{шдд}} Y_2 y_{21} - G_{\text{шдд}}) (Y_{\text{кор}} - y_{11} - y_{21})}{R_{\text{шдд}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шд2}}}$
3		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шдд}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шд2}}}{ h_{21} (Z_2 + Z_3) - Z_2 ^2}$ $R_{\text{шш}}^{(p)} = R_{\text{шш1}} + R_{\text{шш2}} + \frac{G_{\text{шдд}} R_{\text{шд2}}  Z_{\text{кор}} - h_{11} - Z_3 h_{21} ^2}{G_{\text{шдд}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шд2}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 - \frac{[G_{\text{шдд}} h_{21}^* (Z_2 + Z_3) Z_2 + R_{\text{шд2}}] [Z_{\text{кор}} - h_{11} - Z_3 h_{21}]}{G_{\text{шдд}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шд2}}}$

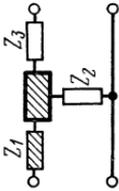
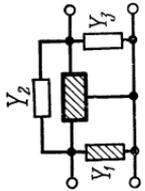
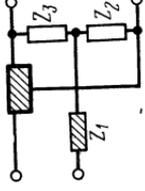
Продолжение табл. 6.7

№ пп.	Схема соединения	формулы результирующих шумовых параметров
4		$R_{\text{шн}} = \frac{R_{\text{шн2}}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{\text{шн2}}}{ f_{21}(Y_2 + Y_3) - Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн1}} + G_{\text{шн2}} + \frac{R_{\text{шн2}} G_{\text{шн2}}  Y_{\text{кор}} - f_{11} - Y_{3f_{21}} ^2}{R_{\text{шн2}}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{\text{шн2}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_2 - \frac{[R_{\text{шн2}} f_{21}^* (Y_2 + Y_3)^* Y_2 + G_{\text{шн2}}] (Y_{\text{кор}} - f_{11} - Y_{3f_{21}})}{R_{\text{шн2}}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{\text{шн2}}}$
5		$G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн2}} + R_{\text{шн1}} + G_{\text{шн2}}  Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}{ Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн1}} + \frac{R_{\text{шн2}} (R_{\text{шн2}} + G_{\text{шн2}}  Z_2 ^2) + G_{\text{шн2}} R_{\text{шн2}}  Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}{R_{\text{шн2}} + R_{\text{шн1}} + G_{\text{шн2}}  Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_2 + \frac{R_{\text{шн1}} + G_{\text{шн2}} (Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}})^* (Z_3 + Z_{\text{кор}})}{R_{\text{шн2}} + R_{\text{шн1}} + G_{\text{шн2}}  Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}$
6		$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн2}} + G_{\text{шн1}} + R_{\text{шн2}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}{ Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн1}} + \frac{G_{\text{шн2}} (G_{\text{шн2}} + R_{\text{шн2}}  Y_2 ^2) + R_{\text{шн2}} G_{\text{шн2}}  Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}{G_{\text{шн2}} + G_{\text{шн1}} + R_{\text{шн2}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_2 + \frac{G_{\text{шн1}} + R_{\text{шн2}} (Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}})^* (Y_3 + Y_{\text{кор}})}{G_{\text{шн2}} + G_{\text{шн1}} + R_{\text{шн2}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}$

III 2	Формулы результирующих шумовых параметров
<p data-bbox="176 1181 196 1356">1</p> 	$G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шн3}}}{ z_{21} + Z_2 ^2},$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{шн}} R_{\text{шн3}}  Z_{\text{кор}} - z_{11} ^2}{G_{\text{шн}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шн3}}},$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + Z_2 + \frac{G_{\text{шн}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шн3}}}{(G_{\text{шн}}^* z_{21} Z_2 - R_{\text{шн3}}) (Z_{\text{кор}} - z_{11})}$
<p data-bbox="559 1181 580 1356">2</p> 	$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шн3}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + \frac{R_{\text{шн}} G_{\text{шн3}}  Y_{\text{кор}} - y_{11} ^2}{R_{\text{шн}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шн3}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 + Y_2 + \frac{(R_{\text{шн}} Y_2 y_{21} - G_{\text{шн3}}) (Y_{\text{кор}} - y_{11})}{R_{\text{шн}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шн3}}}$
<p data-bbox="787 1181 808 1356">3</p> 	$G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шн3}}}{ h_{21} (Z_2 + Z_3) - Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{шн}} R_{\text{шн3}}  Z_{\text{кор}} - h_{11} - Z_2 h_{21} ^2}{G_{\text{шн}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шн3}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + Z_2 - \frac{[G_{\text{шн}} h_{21}^* (Z_2 + Z_3)^* Z_2 + R_{\text{шн3}}] (Z_{\text{кор}} - h_{11} + Z_2 h_{21})}{G_{\text{шн}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шн3}}}$

№ п/п	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
4		$R_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шд}}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{\text{шз}}}{ f_{21}(Y_2 + Y_3) - Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + \frac{R_{\text{шд}} G_{\text{шз}}  Y_{\text{кор}} - f_{11} + Y_{2/21} ^2}{R_{\text{шд}}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{\text{шз}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 + Y_2 - \frac{[R_{\text{шд}} f_{21}^* (Y_2 + Y_3)^* Y_2 + G_{\text{шз}}] (Y_{\text{кор}} - f_{11} + Y_{2/21})}{R_{\text{шд}}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{\text{шз}}}$
5		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{ Z_2 ^2}{R_{\text{шз}} + R_{\text{шн}} + G_{\text{шд}}  Z_{\text{кор}} + Z_2 + Z_3 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шд}}  Z_2 ^2 (R_{\text{шн}} + R_{\text{шз}})}{R_{\text{шз}} + R_{\text{шн}} + G_{\text{шд}}  Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_2 - \frac{G_{\text{шд}} (Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}})^* Z_2^2}{R_{\text{шз}} + R_{\text{шд}} + G_{\text{шд}}  Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}$
6		$R_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шз}} + G_{\text{шн}} + R_{\text{шд}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}{ Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шд}}  Y_2 ^2 (G_{\text{шн}} + R_{\text{шз}})}{G_{\text{шз}} + G_{\text{шн}} + R_{\text{шд}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_2 - \frac{R_{\text{шд}} Y_2^2 (Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}})^*}{G_{\text{шз}} + G_{\text{шн}} + R_{\text{шд}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}$

Таблица 6.9

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шд}}  z_{21} ^2}{ z_{21} + Z_2 ^2},$ $R_{\text{шд}}^{(p)} = R_{\text{шд}} + R_{\text{ш1}},$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + Z_2 \left( 1 + \frac{Z_{\text{кор}} - z_{11}}{z_{21}} \right)$
2		$R_{\text{шд}}^{(p)} = R_{\text{шд}} \left  \frac{y_{21}}{y_{21} + Y_2} \right ^2$ $G_{\text{шд}}^{(p)} = G_{\text{шд}} + G_{\text{ш1}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{1,1} + Y_{\text{кор}} \left( 1 + \frac{Y_2}{y_{21}} \right) + Y_2 \left( 1 - \frac{y_{11}}{y_{21}} \right)$
3		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шд}}  h_{21}(Z_2 + Z_3) ^2}{ h_{21}(Z_2 + Z_3) - Z_2 ^2}$ $R_{\text{шд}}^{(p)} = R_{\text{шд}} + R_{\text{ш1}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 - \frac{Z_2(Z_{\text{кор}} - h_{11} - Z_3 h_{21})}{h_{21}(Z_2 + Z_3)}$

Продолжение табл. 6.9

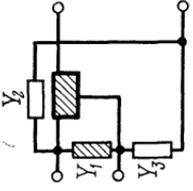
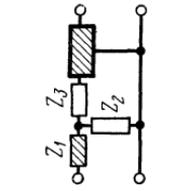
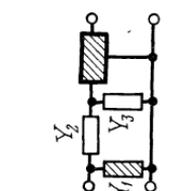
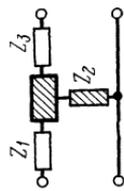
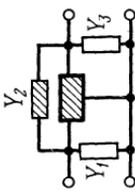
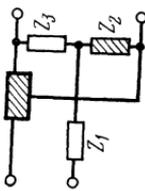
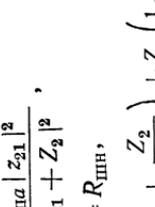
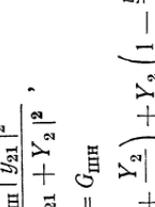
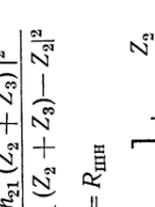
№ ш	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
4		$R_{\text{ша}}^{(p)} = R_{\text{ша}} \left  \frac{f_{21}(Y_2 + Y_3)}{f_{32}(Y_2 + Y_3) - Y_2} \right ^2$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + G_{\text{ш1}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 - \frac{Y_2(Y_{\text{кор}} - f_{11} - Y_3 f_{21})}{f_{21}(Y_2 + Y_3)}$
5		$G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн}} + G_{\text{ша}}  Z_2 + Z_{\text{кор}} ^2}{ Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{ша}} R_{\text{шн}}  Z_2 ^2}{R_{\text{шн}} + G_{\text{ша}}  Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_2 \frac{R_{\text{шн}} + G_{\text{ша}} (Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}})^* (Z_3 + Z_{\text{кор}})}{R_{\text{шн}} + G_{\text{ша}}  Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}$
6		$R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}{ Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{ша}} R_{\text{ша}}  Y_2 ^2}{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_2 \frac{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}} (Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}})^* (Y_3 + Y_{\text{кор}})}{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}$

Таблица 6.10

№ п/п	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шдд}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шдд}}}{ z_{21} + Z_2 ^2},$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{шдд}} R_{\text{шдд}}  Z_{\text{кор}} - z_{11} + z_{21} ^2}{G_{\text{шдд}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шдд}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + \frac{(G_{\text{шдд}}^* z_{21} Z_2 - R_{\text{шдд}}) (Z_{\text{кор}} - z_{11} + z_{21})}{G_{\text{шдд}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шдд}}}$
2		$R_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шдд}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шдд}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + \frac{R_{\text{шдд}} G_{\text{шдд}}  Y_{\text{кор}} - y_{11} + y_{21} ^2}{R_{\text{шдд}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шдд}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 + \frac{(R_{\text{шдд}} Y_2^* / y_{21} - G_{\text{шдд}}) (Y_{\text{кор}} - y_{11} + y_{21})}{R_{\text{шдд}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шдд}}}$
3		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шдд}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шдд}}}{ h_{21} (Z_2 + Z_3) - Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{шдд}} R_{\text{шдд}}  Z_{\text{кор}} - h_{11} - Z_3 h_{21} ^2}{G_{\text{шдд}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шдд}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 - \frac{[G_{\text{шдд}}^* h_{21} (Z_2 + Z_3)^* Z_2 + R_{\text{шдд}}] (Z_{\text{кор}} - h_{11} - Z_3 h_{21})}{G_{\text{шдд}}  h_{21} (Z_2 + Z_3) ^2 + R_{\text{шдд}}}$

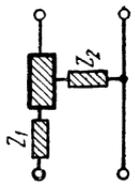
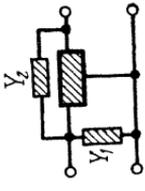
№ п/п	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
4		$R_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шд}}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{\text{шд}}}{ f_{21}(Y_2 + Y_3) - Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + \frac{R_{\text{шд}} G_{\text{шд}}  Y_{\text{кор}} - f_{11} - Y_3 f_{21} ^2}{R_{\text{шд}}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{\text{шд}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 - \frac{[R_{\text{шд}} f_{21}(Y_2 + Y_3)^* Y_2 + G_{\text{шд}}](Y_{\text{кор}} - f_{11} - Y_3 f_{21})}{R_{\text{шд}}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2 + G_{\text{шд}}}$
5		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шд}} + R_{\text{шн}} + G_{\text{шд}}  Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}{ Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}} = \frac{R_{\text{шн}}(R_{\text{шд}} + G_{\text{шд}}  Z_3 ^2) + G_{\text{шд}} R_{\text{шд}}  Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}{R_{\text{шд}} + R_{\text{шн}} + G_{\text{шд}}  Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_2 - \frac{R_{\text{шн}} + G_{\text{шд}} (Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}})^* (Z_3 + Z_{\text{кор}})}{R_{\text{шд}} + R_{\text{шн}} + G_{\text{шд}}  Z_2 + Z_3 + Z_{\text{кор}} ^2}$
6		$R_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шд}} + G_{\text{шн}} + R_{\text{шд}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}{ Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}}(G_{\text{шд}} + R_{\text{шд}}  Y_2 ^2) + R_{\text{шд}} G_{\text{шд}}  Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}{G_{\text{шд}} + G_{\text{шн}} + R_{\text{шд}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_2 - \frac{G_{\text{шн}} + R_{\text{шд}} (Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}})^* (Y_3 + Y_{\text{кор}})}{G_{\text{шд}} + G_{\text{шн}} + R_{\text{шд}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}$

Таблица 6.11

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шд}}  z_{21} ^2}{ z_{21} + Z_2 ^2},$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}},$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_{\text{кор}} \left( 1 + \frac{Z_2}{z_{21}} \right) + Z_2 \left( 1 - \frac{z_{11}}{z_{21}} \right)$
2		$R_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш}}  y_{21} ^2}{ y_{21} + Y_2 ^2},$ $G_{\text{шп}}^{(p)} = G_{\text{шн}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_{\text{кор}} \left( 1 + \frac{Y_2}{y_{21}} \right) + Y_2 \left( 1 - \frac{y_{11}}{y_{21}} \right)$
3		$G_{\text{шд}}^{(p)} = G_{\text{шд}} \frac{ h_{21}(Z_2 + Z_3) ^2}{ h_{21}(Z_2 + Z_3) - Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_{\text{кор}} \left[ 1 - \frac{Z_2}{h_{21}(Z_2 + Z_3)} \right] + \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} \left( Z_3 + \frac{h_{11}}{h_{21}} \right)$

№ п/п	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
4		$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн}}  f_{21}(Y_2 + Y_3) ^2}{ f_{21}(Y_2 + Y_3) - Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_{\text{кор}} \left[ 1 - \frac{Y_2}{(Y_2 + Y_3)f_{21}} \right] + \frac{Y_2}{Y_2 + Y_3} \left( Y_3 + \frac{f_{11}}{f_{21}} \right)$
5		$G_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}  Y_2 ^2 + G_{\text{шн}}  1 + Y_2(Z_3 + Z_{\text{кор}}) ^2$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}} R_{\text{шн}}}{R_{\text{шн}}  Y_2 ^2 + G_{\text{шн}}  1 + Y_2(Z_3 + Z_{\text{кор}}) ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_2 \left\{ 1 - \frac{G_{\text{шн}} [1 + Y_2^*(Z_3^* + Z_{\text{кор}}^*)]}{R_{\text{шн}}  Y_2 ^2 + G_{\text{шн}}  1 + Y_2(Z_3 + Z_{\text{кор}}) ^2} \right\}$
6		$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}} + R_{\text{шн}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}{ Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}} R_{\text{шн}}  Y_2 ^2}{G_{\text{шн}} + R_{\text{шн}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_2 \frac{G_{\text{шн}} + R_{\text{шн}} (Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}})^* (Y_3 + Y_{\text{кор}})}{G_{\text{шн}} + R_{\text{шн}}  Y_2 + Y_3 + Y_{\text{кор}} ^2}$

Таблица 6.12

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	шумовые
		сигнальные	
1		$z_{11}^{(p)} = z_{11} + Z_1 + Z_2$ $z_{12}^{(p)} = z_{12} - Z_2$ $z_{21}^{(p)} = z_{21} + Z_2$ $z_{22}^{(p)} = z_{22} - Z_2$	$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шд}}   z_{21}  ^2 + R_{\text{шд}2}}{  z_{21} + Z_2  ^2}$ $R_{\text{шд}}^{(p)} = R_{\text{шд}} + R_{\text{шд}1} + \frac{G_{\text{шд}} R_{\text{шд}2}   Z_{\text{кор}} - z_{11} + z_{21}  ^2}{G_{\text{шд}}   z_{21}  ^2 + R_{\text{шд}2}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + \frac{(G_{\text{шд}} z_{21} Z_2 - R_{\text{шд}2}) (Z_{\text{кор}} - z_{11} + z_{21})}{G_{\text{шд}}   z_{21}  ^2 + R_{\text{шд}2}}$
2		$y_{12}^{(p)} = y_{11} + Y_1 + Y_2$ $y_{12}^{(p)} = y_{12} - Y_2$ $y_{21}^{(p)} = y_{21} + Y_2$ $y_{22}^{(p)} = y_{22} - Y_2$	$R_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шд}}   y_{21}  ^2 + G_{\text{шд}2}}{  y_{21} + Y_2  ^2}$ $G_{\text{шд}}^{(p)} = G_{\text{шд}} + G_{\text{шд}1} + \frac{R_{\text{шд}} G_{\text{шд}2}   Y_{\text{кор}} - y_{11} + y_{21}  ^2}{R_{\text{шд}}   y_{21}  ^2 + G_{\text{шд}2}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 + \frac{(R_{\text{шд}} y_{21} Y_2 - G_{\text{шд}2}) (Y_{\text{кор}} - y_{11} + y_{21})}{R_{\text{шд}}   y_{21}  ^2 + G_{\text{шд}2}}$

Ш №	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	шумовые
		сигнальные	
3		$a_{11}^{(p)} = \frac{1}{Z_{21}} [(1 + Z_1 Y_2) z_{11} + Z_1]$ $a_{11}^{(p)} = -\frac{1}{Z_{21}} [(1 + Z_1 Y_2) \Delta z + Z_1 z_{22}]$ $a_{21}^{(p)} = \frac{1}{Z_{21}} (1 + Y_2 z_{11})$ $a_{22}^{(p)} = -\frac{1}{Z_{21}} (Y_2 \Delta z + z_{22})$	$G_{шпa}^{(p)} = \frac{R_{шп2} + R_{шпн} + G_{шпa}}{ Z_2 ^2}  Z_{кор} + Z_2 ^2$ $R_{шпн}^{(p)} = R_{шп1} + \frac{R_{шпн}(R_{шп2} + G_{шпa}  Z_2 ^2) + G_{шпa} R_{шп2}}{R_{шп2} + R_{шпн} + G_{шпa}  Z_2 + Z_{кор} ^2}$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_1 + Z_2 \frac{R_{шпн} + G_{шпa} Z_{кор}(Z_2 + Z_{кор})^*}{R_{шп2} + R_{шпн} + G_{шпa}  Z_2 + Z_{кор} ^2}$
4		$a_{11}^{(p)} = -\frac{1}{y_{21}} (Z_2 \Delta y + y_{22})$ $a_{12}^{(p)} = \frac{1}{y_{21}} (1 + Z_2 y_{11})$ $a_{21}^{(p)} = -\frac{1}{y_{21}} [(1 + Y_1 Z_2) \Delta y + Y_1 y_{22}]$ $a_{22}^{(p)} = \frac{1}{y_{21}} [(1 + Y_1 Z_2) y_{11} + Y_1]$	$R_{шпa}^{(p)} = \frac{G_{шп2} + G_{шпн} + R_{шпa}}{ Y_2 ^2}  Y_2 + Y_{кор} ^2$ $G_{шпн}^{(p)} = G_{шп1} + \frac{G_{шпн}(G_{шп2} + R_{шпa}  Y_2 ^2) + R_{шпa} G_{шп2}}{G_{шп2} + G_{шпн} + R_{шпa}  Y_2 + Y_{кор} ^2}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_1 + Y_2 \frac{G_{шпн} + R_{шпa}(Y_2 + Y_{кор})^* Y_{кор}}{G_{шп2} + G_{шпн} + R_{шпa}  Y_2 + Y_{кор} ^2}$

Примечание. В табл. 6.12; 6.13; 6.14; 6.15 сигнальные параметры одинаковы.

Таблица 6.13

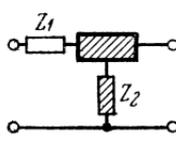
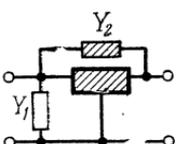
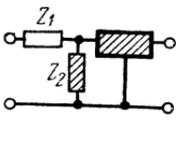
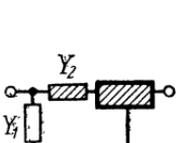
№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{шa}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шa}}  z_{21} ^2 + R_{\text{ш2}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{шa}} R_{\text{ш2}}  Z_{\text{кор}} - z_{11} + z_{21} ^2}{G_{\text{шa}}  z_{21} ^2 + R_{\text{ш2}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + \frac{(G_{\text{шa}} z_{21}^* Z_2 - R_{\text{ш2}})(Z_{\text{кор}} - z_{11} + z_{21})}{G_{\text{шa}}  z_{21} ^2 + R_{\text{ш2}}}$
2		$R_{\text{шa}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шa}}  y_{21} ^2 + G_{\text{ш2}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + \frac{R_{\text{шa}} G_{\text{ш2}}  Y_{\text{кор}} - y_{11} + y_{21} ^2}{R_{\text{шa}}  y_{21} ^2 + G_{\text{ш2}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 + \frac{(R_{\text{шa}} y_{21}^* Y_2 - G_{\text{ш2}})(Y_{\text{кор}} - y_{11} + y_{21})}{R_{\text{шa}}  y_{21} ^2 + G_{\text{ш2}}}$
3		$G_{\text{шa}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{шн}} + G_{\text{шa}}  Z_{\text{кор}} + Z_2 ^2}{ Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн}}(R_{\text{ш2}} + G_{\text{шa}}  Z_2 ^2) + G_{\text{шa}} R_{\text{ш2}}  Z_{\text{кор}} ^2}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{шн}} + G_{\text{шa}}  Z_2 + Z_{\text{кор}} ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_2 \frac{R_{\text{шн}} + G_{\text{шa}} Z_{\text{кор}} (Z_2 + Z_{\text{кор}})^*}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{шн}} + G_{\text{шa}}  Z_2 + Z_{\text{кор}} ^2}$
4		$R_{\text{шa}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш2}} + G_{\text{шн}} + R_{\text{шa}}  Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2}{ Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}}(G_{\text{ш2}} + R_{\text{шa}}  Y_2 ^2) + R_{\text{шa}} G_{\text{ш2}}  Y_{\text{кор}} ^2}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{шн}} + R_{\text{шa}}  Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_2 \frac{G_{\text{шa}} + R_{\text{шa}} (Y_2 + Y_{\text{кор}})^* Y_{\text{кор}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{шн}} + R_{\text{шa}}  Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2}$

Таблица 6.14

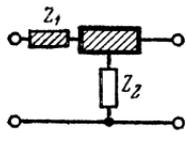
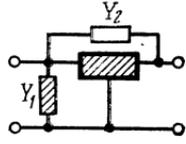
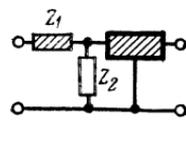
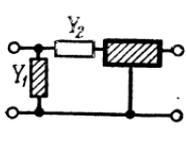
№ ш.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ша}}  z_{21} ^2}{ z_{21} + Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + R_{\text{ш1}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_{\text{кор}} \left(1 + \frac{Z_2}{z_{21}}\right) + Z_2 \left(1 - \frac{z_{11}}{z_{21}}\right)$
2		$R_{\text{ша}}^{(p)} = R_{\text{ша}} \left  \frac{y_{21}}{y_{21} + Y_2} \right ^2$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + G_{\text{ш1}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_{\text{кор}} \left(1 + \frac{Y_2}{y_{21}}\right) + Y_2 \left(1 - \frac{y_{11}}{y_{21}}\right)$
3		$G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн}} + G_{\text{ша}}  Z_{\text{кор}} + Z_2 ^2}{ Z_2 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{ша}} R_{\text{шн}}  Z_2 ^2}{R_{\text{шн}} + G_{\text{ша}}  Z_2 + Z_{\text{кор}} ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_2 \frac{R_{\text{шн}} + G_{\text{ша}} Z_{\text{кор}} (Z_2 + Z_{\text{кор}})^*}{R_{\text{шн}} + G_{\text{ша}}  Z_2 + Z_{\text{кор}} ^2}$
4		$R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}}  Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2}{ Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{шн}} R_{\text{ша}}  Y_2 ^2}{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}}  Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_2 \frac{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}} (Y_2 + Y_{\text{кор}})^* Y_{\text{кор}}}{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}}  Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2}$

Таблица 6.15

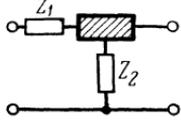
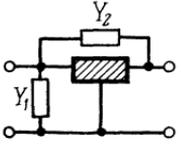
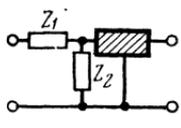
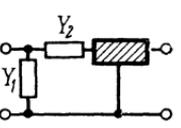
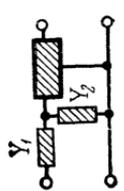
№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{ша}}^{(p)} = G_{\text{ша}} \left  \frac{z_{21}}{z_{21} + Z_2} \right ^2$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_{\text{кор}} \left( 1 + \frac{Z_2}{z_{21}} \right) + Z_2 \left( 1 - \frac{z_{11}}{z_{21}} \right)$
2		$R_{\text{ша}}^{(p)} = R_{\text{ша}} \left  \frac{y_{21}}{y_{21} + Y_2} \right ^2$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_{\text{кор}} \left( 1 + \frac{Y_2}{y_{21}} \right) + Y_2 \left( 1 - \frac{y_{11}}{y_{21}} \right)$
3		$G_{\text{ша}}^{(p)} = R_{\text{шн}}  Y_2 ^2 + G_{\text{ша}}  1 + Y_2 Z_{\text{кор}} ^2$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ша}} R_{\text{шн}}}{R_{\text{шн}}  Y_2 ^2 + G_{\text{ша}}  1 + Y_2 Z_{\text{кор}} ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_2 \left\{ 1 - \frac{G_{\text{ша}} (1 + Y_2^* Z_{\text{кор}}^*)}{R_{\text{шн}}  Y_2 ^2 + G_{\text{ша}}  1 + Y_2 Z_{\text{кор}} ^2} \right\}$
4		$R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}}  Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2}{ Y_2 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}} R_{\text{ша}}  Y_2 ^2}{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}}  Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_2 \frac{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}} (Y_2 + Y_{\text{кор}})^* Y_{\text{кор}}}{G_{\text{шн}} + R_{\text{ша}}  Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2}$

Таблица 6.16

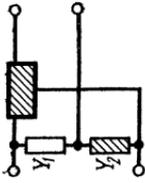
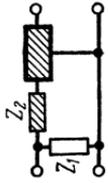
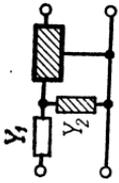
п/п	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	шумовые
№	сигнальные		
1		$f_{11}^{(p)} = f_{11} + \frac{1}{Z_1 + Z_2}$ $f_{12}^{(p)} = f_{12} - \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$ $f_{21}^{(p)} = f_{21} - \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$ $f_{22}^{(p)} = f_{22} - \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$	$R_{шца}^{(p)} = \frac{R_{шца}   f_{21} (Y_1 + Y_2)  ^2 + G_{ш1} + G_{ш2}}{  f_{21} (Y_1 + Y_2) - Y_1  ^2}$ $G_{шн}^{(p)} = G_{шн} + \frac{1}{G_{ш1} + G_{ш2}} \left[ G_{ш1} G_{ш2} + \frac{R_{шца} (Y_{кор} - f_{11}) (G_{ш1} + G_{ш2}) + (Y_1 G_{ш2} - G_{ш1} Y_2) f_{21}  ^2}{R_{шца}   f_{21} (Y_1 + Y_2)  ^2 + G_{ш1} + G_{ш2}} \right]$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} + \frac{1}{G_{ш1} + G_{ш2}} \left\{ Y_1 G_{ш2} - \frac{[R_{шца} f_{21}^* (Y_1 + Y_2) + (G_{ш1} + G_{ш2})] [(Y_{кор} - f_{11}) \times \rightarrow \rightarrow \rightarrow \times (G_{ш1} + G_{ш2}) + (Y_1 G_{ш2} - G_{ш1} Y_2) f_{21}]}{\rightarrow + G_{ш1} + G_{ш2}} \right\}$
2		$a_{11}^{(p)} = \frac{1}{z_{21}} (z_{11} + Z_2)$ $a_{12}^{(p)} = - \frac{1}{z_{21}} (\Delta z + Z_2 z_{22})$	$G_{шца}^{(p)} = \frac{R_{ш1} + R_{ш2} + R_{шца} + G_{шца}}{  Z_1  ^2} \left[ Z_{кор} + Z_1 + Z_2 \right]^2$ $R_{шн}^{(p)} = \frac{1}{R_{ш1} + R_{ш2}} \left\{ R_{ш1} R_{ш2} + \frac{R_{шн} [ R_{ш1}^2 + G_{шца} (R_{ш1} + R_{ш2}) + R_{ш2} ] + \rightarrow + \rightarrow + \rightarrow}{R_{ш1} + R_{ш2} + R_{шн}} \right\}$

Продолжение табл. 6.16

Ш Э	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	
		сигнальные	шумовые
2	$a_{21}^{(p)} = \frac{1}{z_{21}} [1 + Y_1(z_{11} + Z_2)]$ $a_{22}^{(p)} = -\frac{1}{z_{21}} [Y_1 \Delta z + (1 + Y_1 Z_2) z_{22}]$	$\rightarrow + \frac{G_{\text{ш}a}   R_{\text{ш}1}(Z_2 + Z_{\text{кор}}) - R_{\text{ш}2} Z_1 ^2}{\rightarrow + G_{\text{ш}a}   Z_1 + Z_2 + Z_{\text{кор}} ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = \frac{Z_1}{R_{\text{ш}1} + R_{\text{ш}2}} \left\{ R_{\text{ш}2} + \frac{R_{\text{ш}1} R_{\text{ш}1} + G_{\text{ш}a}(Z_1 + Z_2 + Z_{\text{кор}}) * [R_{\text{ш}1}(Z_2 + Z_{\text{кор}}) - Z_1 R_{\text{ш}2}]}{R_{\text{ш}1} + R_{\text{ш}2} + R_{\text{ш}1} + G_{\text{ш}a}   Z_1 + Z_2 + Z_{\text{кор}} ^2} \right\}$	
3	 $a_{11}^{(p)} = -\frac{1}{y_{21}} [Z_1 \Delta y + (1 + Z_1 Y_2) y_{22}]$ $a_{12}^{(p)} = \frac{1}{y_{21}} [1 + Z_1 (y_{11} + Y_2)]$ $a_{21}^{(p)} = -\frac{1}{y_{21}} (\Delta y + Y_2 y_{22})$ $a_{22}^{(p)} = \frac{1}{y_{21}} (y_{11} + Y_2)$	$R_{\text{ш}a}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш}1} + G_{\text{ш}2} + G_{\text{ш}1} + R_{\text{ш}a}   Y_1 + Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2}{  Y_2 ^2}$ $G_{\text{ш}1}^{(p)} = \frac{1}{G_{\text{ш}1} + G_{\text{ш}2}} \left\{ G_{\text{ш}1} G_{\text{ш}2} + \frac{G_{\text{ш}1} [G_{\text{ш}1}^2 + R_{\text{ш}a} (G_{\text{ш}1} + \rightarrow + G_{\text{ш}2})   Y_1 ^2 + R_{\text{ш}a}   G_{\text{ш}1}(Y_2 + Y_{\text{кор}}) - G_{\text{ш}2} Y_1 ^2]}{\rightarrow + R_{\text{ш}a}   Y_1 + Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2} \right\}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = \frac{Y_1}{G_{\text{ш}1} + G_{\text{ш}2}} \left\{ G_{\text{ш}2} + \frac{G_{\text{ш}1} G_{\text{ш}1} + R_{\text{ш}a}(Y_1 + Y_2 + Y_{\text{кор}}) * [G_{\text{ш}1}(Y_2 + Y_{\text{кор}}) - Y_1 G_{\text{ш}2}]}{G_{\text{ш}1} + G_{\text{ш}2} + G_{\text{ш}1} + R_{\text{ш}a}   Y_1 + Y_2 + Y_{\text{кор}} ^2} \right\}$	

Примечание. В табл. 6.16; 6.17; 6.18; 6.19 сигнальные параметры одинаковы.

Таблица 6.17

№ ш.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{шд}^{(p)} = \frac{R_{шд}  f_{21} (Y_1 + Y_2) ^2 + G_{шз}}{ f_{21} (Y_1 + Y_2) - Y_1 ^2}$ $G_{шд}^{(p)} = G_{шд} + \frac{R_{шд} G_{шз}  Y_{кор} - f_{11} + Y_1 f_{21} ^2}{R_{шд}  f_{21} (Y_1 + Y_2) ^2 + G_{шз}}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} - \frac{[R_{шд} f_{21}^* (Y_1 + Y_2)^* Y_1 + G_{шз}] (Y_{кор} - f_{11} + Y_1 f_{21})}{R_{шд}  f_{21} (Y_1 + Y_2) ^2 + G_{шз}}$
2		$G_{шд}^{(p)} = \frac{R_{шд} + R_{шз} + G_{шд}  Z_1 + Z_2 + Z_{кор} ^2}{ Z_1 ^2}$ $R_{шд}^{(p)} = \frac{G_{шд}  Z_1 ^2 (R_{шд} + R_{шз})}{R_{шд} + R_{шз} + G_{шд}  Z_1 + Z_2 + Z_{кор} ^2}$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_1 - \frac{G_{шд} Z_1^2 (Z_1 + Z_2 + Z_{кор})^*}{R_{шд} + R_{шз} + G_{шд}  Z_1 + Z_2 + Z_{кор} ^2}$
3		$R_{шд}^{(p)} = \frac{G_{шд} + R_{шд} (Y_1 + Y_2 + Y_{кор})^2 + G_{шз}}{ Y_2 ^2}$ $G_{шд}^{(p)} = \frac{R_{шд}  Y_1 ^2 (G_{шд} + G_{шз})}{G_{шд} + G_{шз} + R_{шд}  Y_1 + Y_2 + Y_{кор} ^2}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_2 - \frac{R_{шд} Y_1^2 (Y_1 + Y_2 + Y_{кор})^*}{G_{шд} + G_{шз} + R_{шд}  Y_1 + Y_2 + Y_{кор} ^2}$

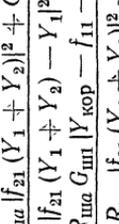
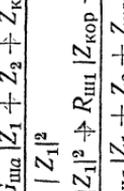
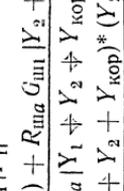
№ шт.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{шв}^{(p)} = \frac{R_{шв}  f_{21} (Y_1 + Y_2) ^2 + G_{ш1}}{ f_{21} (Y_1 + Y_2) - Y_1 ^2}$ $G_{шн}^{(p)} = G_{шн} + \frac{R_{шв} G_{ш1}  Y_{кор} - f_{11} - Y_2 f_{21} ^2}{R_{шв}  f_{21} (Y_1 + Y_2) ^2 + G_{ш1}}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} - \frac{[R_{шв} f_{21} (Y_1 + Y_2)^* Y_1 + G_{ш1}] (Y_{кор} - f_{11} - Y_2 f_{21})}{R_{шв}  f_{21} (Y_1 + Y_2) ^2 + G_{ш1}}$
2		$G_{шв}^{(p)} = \frac{R_{ш1} + R_{шн} + G_{шв}  Z_1 + Z_2 + Z_{кор} ^2}{ Z_1 ^2}$ $R_{шн}^{(p)} = \frac{R_{шн} R_{ш1} + G_{шв}  Z_1 ^2 + R_{ш1}  Z_{кор} + Z_2 ^2}{R_{ш1} + R_{шн} + G_{шв}  Z_1 + Z_2 + Z_{кор} ^2}$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_1 \frac{R_{шн} + G_{шв} (Z_1 + Z_2 + Z_{кор})^* (Z_2 + Z_{кор})}{R_{ш1} + R_{шн} + G_{шв}  Z_1 + Z_2 + Z_{кор} ^2}$
3		$R_{шв}^{(p)} = \frac{G_{ш1} + G_{шн} + R_{шв}  Y_1 + Y_2 + Y_{кор} ^2}{G_{шн}  Y_1 ^2}$ $G_{шн}^{(p)} = \frac{G_{шн} (G_{ш1} + R_{шв}  Y_1 ^2) + R_{шв} G_{ш1}  Y_2 + Y_{кор} ^2}{G_{ш1} + G_{шн} + R_{шв}  Y_1 + Y_2 + Y_{кор} ^2}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_1 \frac{G_{шн} + R_{шв} (Y_1 + Y_2 + Y_{кор})^* (Y_2 + Y_{кор})}{G_{ш1} + G_{шн} + R_{шв}  Y_1 + Y_2 + Y_{кор} ^2}$

Таблица 6.19

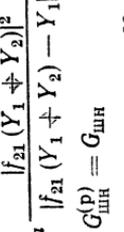
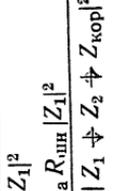
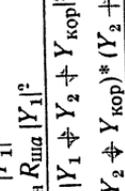
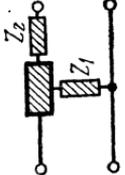
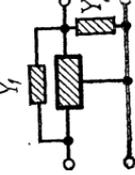
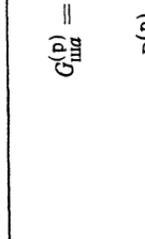
№ пп	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} \frac{ f_{21}(Y_1 \nrightarrow Y_2) ^2}{ f_{21}(Y_1 \nrightarrow Y_2) - Y_1 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} \left[ 1 - \frac{Y_1}{(Y_1 + Y_2) f_{21}} \right] \nrightarrow \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2} \left( Y_2 \nrightarrow \frac{f_{11}}{f_{21}} \right)$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн}} + G_{\text{шн}}  Z_1 + Z_2 + Z_{\text{кор}} ^2}{ Z_1 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}} R_{\text{шн}}  Z_1 ^2}{R_{\text{шн}} \nrightarrow G_{\text{шн}}  Z_1 \nrightarrow Z_2 \nrightarrow Z_{\text{кор}} ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 \frac{R_{\text{шн}} + G_{\text{шн}} (Z_1 \nrightarrow Z_2 \nrightarrow Z_{\text{кор}}) * (Z_2 \nrightarrow Z_{\text{кор}})}{R_{\text{шн}} + G_{\text{шн}}  Z_1 \nrightarrow Z_2 \nrightarrow Z_{\text{кор}} ^2}$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}}  Y_1 \nrightarrow Y_2 \nrightarrow Y_{\text{кор}} ^2}{ Y_1 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шн}} R_{\text{шн}}  Y_1 ^2}{G_{\text{шн}} \nrightarrow R_{\text{шн}}  Y_1 \nrightarrow Y_2 \nrightarrow Y_{\text{кор}} ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 \frac{G_{\text{шн}} + R_{\text{шн}} (Y_1 + Y_2 \nrightarrow Y_{\text{кор}}) * (Y_2 + Y_{\text{кор}})}{G_{\text{шн}} + R_{\text{шн}}  Y_1 \nrightarrow Y_2 \nrightarrow Y_{\text{кор}} ^2}$

Таблица 6.20

№ лп.	Схема соединения	сигнальные	формулы результирующих параметров шумовые
1		$z_{11}^{(p)} = z_{11} \uparrow Z_1$ $z_{12}^{(p)} = z_{12} \dashv Z_1$ $z_{21}^{(p)} = z_{21} \uparrow Z_1$ $z_{22}^{(p)} = z_{22} \dashv (Z_1 \uparrow Z_2)$	$G_{шш}^{(p)} = \frac{G_{шш}  z_{21} ^2 + R_{ш1} \uparrow R_{ш2}}{ z_{21} + Z_1 ^2}$ $R_{шш}^{(p)} = R_{шш} \uparrow \frac{1}{R_{ш1} R_{ш2} \uparrow \frac{G_{шш} [(Z_{кор} - z_{11}) (R_{ш1} \uparrow R_{ш2}) \uparrow z_{21} R_{ш1}]^2}{G_{шш}  z_{21} ^2 + R_{ш1} \uparrow R_{ш2}}}}$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_{кор} \uparrow \frac{1}{R_{ш1} + R_{ш2}} \left\{ Z_1 R_{ш2} \uparrow \left[ \frac{G_{шш} z_{21} Z_1 - (R_{ш1} \uparrow R_{ш2}) [(Z_{кор} - z_{11}) (R_{ш1} \uparrow R_{ш2}) \uparrow z_{21} R_{ш1}]}{G_{шш}  z_{21} ^2 + R_{ш1} + R_{ш2}} \right] \right\}$
2		$y_{11}^{(p)} = y_{11} \uparrow Y_1$ $y_{12}^{(p)} = y_{12} \dashv Y_1$ $y_{21}^{(p)} = y_{21} \uparrow Y_1$ $y_{22}^{(p)} = y_{22} \dashv (Y_1 \uparrow Y_2)$	$R_{шш}^{(p)} = \frac{R_{шш}  y_{21} ^2 \uparrow G_{ш1} \uparrow G_{ш2}}{ y_{21} \uparrow Y_1 ^2}$ $G_{шш}^{(p)} = G_{шш} \uparrow \frac{1}{G_{ш1} G_{ш2} \uparrow \frac{R_{шш} [(Y_{кор} - y_{11}) (G_{ш1} \uparrow G_{ш2}) \uparrow G_{ш1} y_{21}]^2}{R_{шш}  y_{21} ^2 + G_{ш1} \uparrow G_{ш2}}}}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} \uparrow \frac{1}{G_{ш1} + G_{ш2}} \left\{ Y_1 G_{ш2} \uparrow \left[ \frac{R_{шш} y_{21} Y_1 - (G_{ш1} \uparrow G_{ш2}) [(Y_{кор} - y_{11}) (G_{ш1} \uparrow G_{ш2}) \uparrow G_{ш1} y_{21}]}{R_{шш}  y_{21} ^2 + G_{ш1} \uparrow G_{ш2}} \right] \right\}$

Продолжение табл. 6.20

№ пп.	Схема соединения	сигнальные	формулы результирующих параметров шумовые
3		$h_{11}^{(p)} = h_{11} \nabla \frac{1}{Y_1 \nabla Y_2}$ $h_{12}^{(p)} = h_{12} \nabla \frac{Y_2}{Y_1 \nabla Y_2}$ $h_{21}^{(p)} = h_{21} \nabla \frac{Y_2}{Y_1 \nabla Y_2}$ $h_{22}^{(p)} = h_{22} \nabla \frac{Y_1 Y_2}{Y_1 \nabla Y_2}$	$G_{шд}^{(p)} = \frac{G_{шд}  h_{21} (Z_1 \nabla Z_2) ^2 \nabla R_{ш1} \nabla R_{ш2}}{ h_{21} (Z_1 \nabla Z_2) - Z_1 ^2}$ $R_{шд}^{(p)} = R_{шд} \nabla \frac{1}{R_{ш1} \nabla R_{ш2}} \left[ R_{ш1} R_{ш2} \nabla \frac{1}{G_{шд}  Z_{кор} - h_{11} (R_{ш1} + R_{ш2}) + (Z_1 R_{ш2} - R_{ш1} Z_2) h_{21} ^2} \right]$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_{кор} \nabla \frac{1}{R_{ш1} + R_{ш2}} \left\{ Z_1 R_{ш2} - \frac{[G_{шд} h_{21} (Z_1 \nabla Z_2)^* Z_1 + R_{ш1} + R_{ш2}] [(Z_{кор} - h_{11}) (R_{ш1} \nabla R_{ш2}) \nabla \rightarrow]}{G_{шд}  h_{21} (Z_1 \nabla Z_2) ^2 \nabla \rightarrow} \rightarrow \nabla \frac{[ (Z_1 R_{ш2} - R_{ш1} Z_2) h_{21} ]}{\rightarrow \nabla R_{ш1} \nabla R_{ш2}} \right\}$

Примечание. В табл. 6.20; 6.21; 6.22; 6.23 сигнальные параметры одинаковы.

Таблица 6.21

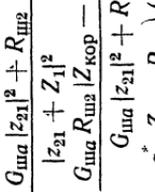
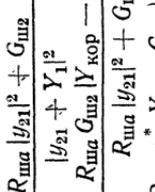
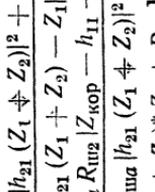
№ пп	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров в
1		$G_{\text{шш}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шш}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шш}2}}{ z_{21} + Z_1 ^2}$ $R_{\text{шш}}^{(p)} = R_{\text{шш}} + \frac{G_{\text{шш}} R_{\text{шш}2}  Z_{\text{кор}} - z_{11} ^2}{G_{\text{шш}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шш}2}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 + \frac{(G_{\text{шш}} z_{21}^* Z_1 - R_{\text{шш}2}) (Z_{\text{кор}} - z_{11})}{G_{\text{шш}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шш}2}}$
2		$R_{\text{шш}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шш}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шш}2}}{ y_{21} + Y_1 ^2}$ $G_{\text{шш}}^{(p)} = G_{\text{шш}} + \frac{R_{\text{шш}} G_{\text{шш}2}  Y_{\text{кор}} - y_{11} ^2}{R_{\text{шш}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шш}2}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 + \frac{(R_{\text{шш}} y_{21}^* Y_1 - G_{\text{шш}2}) (Y_{\text{кор}} - y_{11})}{R_{\text{шш}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шш}2}}$
3		$G_{\text{шш}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шш}}  h_{21} (Z_1 + Z_2) ^2 + R_{\text{шш}2}}{ h_{21} (Z_1 + Z_2) - Z_1 ^2}$ $R_{\text{шш}}^{(p)} = R_{\text{шш}} + \frac{G_{\text{шш}} R_{\text{шш}2}  Z_{\text{кор}} - h_{11} + Z_1 h_{21} ^2}{G_{\text{шш}}  h_{21} (Z_1 + Z_2) ^2 + R_{\text{шш}2}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + Z_1 - \frac{[G_{\text{шш}} h_{21}^* (Z_1 + Z_2)^* Z_1 + R_{\text{шш}2}] (Z_{\text{кор}} - h_{11} + Z_1 h_{21})}{G_{\text{шш}}  h_{21} (Z_1 + Z_2) ^2 + R_{\text{шш}2}}$

Таблица 6.22

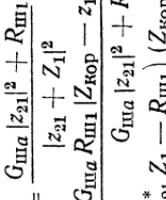
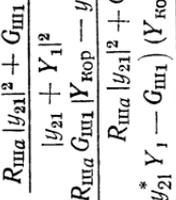
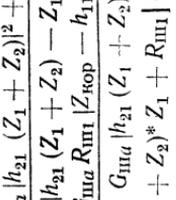
№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{шз}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шзз}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шз1}}}{ z_{21} + Z_1 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шнн}} + \frac{G_{\text{шзз}} R_{\text{шн1}}  Z_{\text{кор}} - z_{11} + z_{21} ^2}{G_{\text{шзз}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шз1}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + \frac{(G_{\text{шзз}} z_{21}^* Z_1 - R_{\text{шн1}}) (Z_{\text{кор}} - z_{11} + z_{21})}{G_{\text{шзз}}  z_{21} ^2 + R_{\text{шз1}}}$
2		$R_{\text{шз}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шзз}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шз1}}}{ y_{21} + Y_1 ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шнн}} + \frac{R_{\text{шзз}} G_{\text{шн1}}  Y_{\text{кор}} - y_{11} + y_{21} ^2}{R_{\text{шзз}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шз1}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + \frac{(R_{\text{шзз}} y_{21}^* Y_1 - G_{\text{шн1}}) (Y_{\text{кор}} - y_{11} + y_{21})}{R_{\text{шзз}}  y_{21} ^2 + G_{\text{шз1}}}$
3		$G_{\text{шз}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шзз}}  h_{21} (Z_1 + Z_2) ^2 + R_{\text{шз1}}}{ h_{21} (Z_1 + Z_2) - Z_1 ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шнн}} + \frac{G_{\text{шзз}} R_{\text{шн1}}  Z_{\text{кор}} - h_{11} - Z_2 h_{21} ^2}{G_{\text{шзз}}  h_{21} (Z_1 + Z_2) ^2 + R_{\text{шз1}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} - \frac{[G_{\text{шзз}} h_{21}^* (Z_1 + Z_2)^* Z_1 + R_{\text{шн1}}] (Z_{\text{кор}} - h_{11} - Z_2 h_{21})}{G_{\text{шзз}}  h_{21} (Z_1 + Z_2) ^2 + R_{\text{шз1}}}$

Таблица 6.23

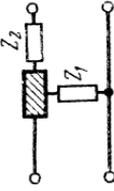
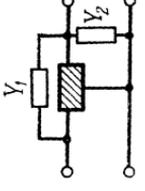
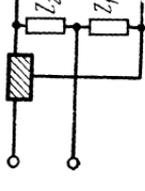
№ шт	Схема соединения	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{шд}}^{(p)} = G_{\text{шд}} \left  \frac{z_{21}}{z_{21} + Z_2} \right ^2$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} \left( 1 + \frac{Z_1}{z_{21}} \right) + Z_1 \left( 1 - \frac{z_{11}}{z_{21}} \right)$
2		$R_{\text{шд}}^{(p)} = R_{\text{шд}} \left  \frac{y_{21}}{y_{21} + Y_1} \right ^2$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} \left( 1 + \frac{Y_1}{y_{21}} \right) + Y_1 \left( 1 - \frac{y_{11}}{y_{21}} \right)$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}$ $G_{\text{шд}}^{(p)} = G_{\text{шд}} \left  \frac{h_{21}(Z_1 + Z_2)}{h_{21}(Z_1 + Z_2) - Z_1} \right ^2$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} \left[ 1 - \frac{Z_1}{h_{21}(Z_1 + Z_2)} \right] + \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \left( Z_2 + \frac{h_{11}}{h_{21}} \right)$

Таблица 6.24

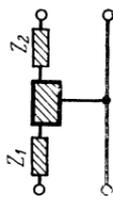
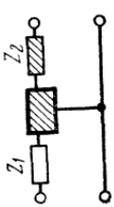
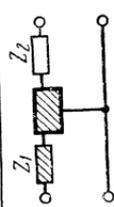
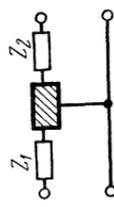
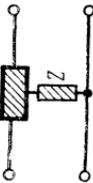
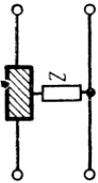
Формулы результирующих параметров		
№ ш.	сигнальные	
№ ш.	шумовые	
1		$G_{\text{ша}}^{(p)} = G_{\text{ша}} \nabla \frac{R_{\text{ш2}}}{ z_{21} ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} \nabla R_{\text{ш1}} \nabla \frac{G_{\text{ша}} R_{\text{ш2}}  Z_{\text{кор}} - z_{11} ^2}{G_{\text{ша}}  z_{21} ^2 \nabla R_{\text{ш2}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} \nabla Z_1 - \frac{R_{\text{ш2}} (Z_{\text{кор}} - z_{11})}{G_{\text{ша}}  z_{21} ^2 \nabla R_{\text{ш2}}}$
2		$G_{\text{ша}}^{(p)} = G_{\text{ша}} + \frac{R_{\text{ш2}}}{ z_{21} ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} \nabla \frac{G_{\text{ша}} R_{\text{ш2}}  Z_{\text{кор}} - z_{11} ^2}{G_{\text{ша}}  z_{21} ^2 \nabla R_{\text{ш2}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} \nabla Z_1 - \frac{R_{\text{ш2}} (Z_{\text{кор}} - z_{11})}{G_{\text{ша}}  z_{21} ^2 \nabla R_{\text{ш2}}}$
3		$G_{\text{ша}}^{(p)} = G_{\text{ша}}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + R_{\text{ш1}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} \nabla Z_1$
4		$G_{\text{ша}}^{(p)} = G_{\text{ша}}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_1 + Z_{\text{кор}}$

Таблица 6.25

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	
		сигнальные	шумовые
1		$y_{11}^{(p)} = y_{11} + Y_1$ $y_{12}^{(p)} = y_{12}$ $y_{21}^{(p)} = y_{21}$ $y_{22}^{(p)} = y_{22} - Y_2$	$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{шн}}}{ y_{21} ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + G_{\text{ш1}} + \frac{R_{\text{шн}} G_{\text{ш2}}  Y_{\text{кор}} - y_{11} ^2}{R_{\text{шн}}  y_{21} ^2 + G_{\text{ш2}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 - \frac{G_{\text{ш2}} (Y_{\text{кор}} - y_{11})}{R_{\text{шн}}  y_{21} ^2 + G_{\text{ш2}}}$
2			$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{ш2}}}{ y_{21} ^2}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + \frac{R_{\text{шн}} G_{\text{ш2}}  Y_{\text{кор}} - y_{11} ^2}{R_{\text{шн}}  y_{21} ^2 + G_{\text{ш2}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1 - \frac{G_{\text{ш2}} (Y_{\text{кор}} - y_{11})}{R_{\text{шн}}  y_{21} ^2 + G_{\text{ш2}}}$
3			$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + G_{\text{ш1}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y_1$
4			$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}$ $G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_1 + Y_{\text{кор}}$

Таблица 6.26

Формулы результирующих параметров		шумовые	
№ шп.	Схема соединения	сигнальные	
1		$z_{11}^{(p)} = z_{11} + Z$ $z_{12}^{(p)} = z_{12} - Z$ $z_{21}^{(p)} = z_{21} + Z$ $z_{22}^{(p)} = z_{22} - Z$	$G_{шд}^{(p)} = \frac{G_{шд}  z_{21} ^2 + R_{ш}}{ z_{21} + Z ^2}$ $R_{шн}^{(p)} = R_{шн} + \frac{G_{шд} R_{ш}  Z_{кор} - z_{11} + z_{21} ^2}{G_{шд}  z_{21} ^2 + R_{ш}}$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_{кор} + \frac{(G_{шд} z_{21} Z - R_{ш}) (Z_{кор} - z_{11} + z_{21})}{G_{шд}  z_{21} ^2 + R_{ш}}$
2			$G_{шд}^{(p)} = G_{шд} \left  \frac{z_{21}}{z_{21} + Z} \right ^2$ $R_{шн}^{(p)} = R_{шн}$ $Z_{кор}^{(p)} = Z_{кор} \left( 1 + \frac{Z}{z_{21}} \right) + Z \left( 1 - \frac{z_{11}}{z_{21}} \right)$

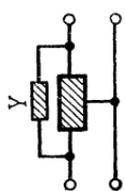
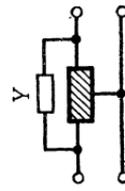
№ пп.	Схема соединения	сигнальные	формулы результирующих параметров шумовые
3		$y_{11}^{(p)} = y_{11} \div Y$ $y_{12}^{(p)} = y_{12} - Y$ $y_{21}^{(p)} = y_{21} \div Y$ $y_{22}^{(p)} = y_{22} - Y$	$R_{шд}^{(p)} = \frac{R_{шд}  y_{21} ^2 \div G_{ш}}{ y_{21} \div Y ^2}$ $G_{шд}^{(p)} = G_{шд} + \frac{R_{шд} G_{ш}  Y_{кор} - y_{11} \div y_{21} ^2}{R_{шд}  y_{21} ^2 \div G_{ш}}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} + \frac{(R_{шд} y_{21}^* Y - G_{ш}) (Y_{кор} - y_{11} \div y_{21})}{R_{шд}  y_{21} ^2 \div G_{ш}}$
4			$R_{шд}^{(p)} = R_{шд} \left  \frac{y_{21}}{y_{21} \div Y} \right ^2$ $G_{шд}^{(p)} = G_{шд}$ $Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} \left( 1 \div \frac{Y}{y_{21}} \right) \div Y \left( 1 - \frac{y_{11}}{y_{21}} \right)$

Таблица 6.27

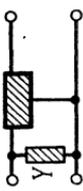
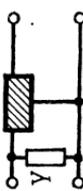
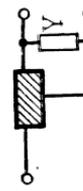
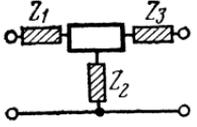
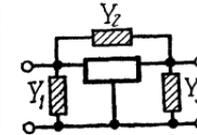
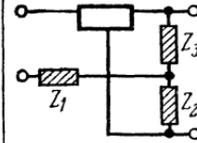
№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	
		сигнальные	шумовые
1		$y_{11}^{(p)} = y_{11} + Y$ $y_{12}^{(p)} = y_{12}$ $y_{21}^{(p)} = y_{21}$ $y_{22}^{(p)} = y_{22}$	$R_{\text{ш}a}^{(p)} = R_{\text{ш}a}$ $G_{\text{ш}n}^{(p)} = G_{\text{ш}n} + G_{\text{ш}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} + Y$
2		$y_{11}^{(p)} = y_{11}$ $y_{12}^{(p)} = y_{12}$ $y_{21}^{(p)} = y_{21}$ $y_{22}^{(p)} = y_{22}$	$R_{\text{ш}a}^{(p)} = R_{\text{ш}a}$ $G_{\text{ш}n}^{(p)} = G_{\text{ш}n}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y + Y_{\text{кор}}$
3		$y_{11}^{(p)} = y_{11}$ $y_{12}^{(p)} = y_{12}$ $y_{21}^{(p)} = y_{21}$ $y_{22}^{(p)} = y_{22} - Y$	$R_{\text{ш}a}^{(p)} = R_{\text{ш}a} + \frac{G_{\text{ш}}}{ y_{21} ^2}$ $G_{\text{ш}n}^{(p)} = G_{\text{ш}n} + \frac{R_{\text{ш}a} G_{\text{ш}}  Y_{\text{кор}} - y_{11} ^2}{R_{\text{ш}a}  y_{21} ^2 + G_{\text{ш}}}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} - \frac{G_{\text{ш}} (Y_{\text{кор}} - y_{11})}{R_{\text{ш}a}  y_{21} ^2 + G_{\text{ш}}}$
4		$y_{11}^{(p)} = y_{11}$ $y_{12}^{(p)} = y_{12}$ $y_{21}^{(p)} = y_{21}$ $y_{22}^{(p)} = y_{22} - Y$	$R_{\text{ш}a}^{(p)} = R_{\text{ш}a}$ $G_{\text{ш}n}^{(p)} = G_{\text{ш}n}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}}$

Таблица 6.28

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих сигналов	
		сигнальные	шумовые
1		$z_{11}^{(p)} = z_{11} + Z$ $z_{12}^{(p)} = z_{12}$ $z_{21}^{(p)} = z_{21}$ $z_{22}^{(p)} = z_{22}$	$G_{\text{шд}}^{(p)} = G_{\text{шд}}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{ш}} \nabla R_{\text{шн}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z \nabla Z_{\text{кор}}$
			$G_{\text{шд}}^{(p)} = G_{\text{шд}}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = \nabla Z_{\text{ш}} + Z_{\text{кор}}$
3		$z_{11}^{(p)} = z_{11}$ $z_{12}^{(p)} = z_{12}$ $z_{21}^{(p)} = z_{21}$ $z_{22}^{(p)} = z_{22} - Z$	$G_{\text{шд}}^{(p)} = \frac{G_{\text{шд}}  z_{21} ^2 \nabla R_{\text{ш}}}{ z_{21} ^2}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} \nabla \frac{G_{\text{шд}} R_{\text{ш}}  Z_{\text{кор}} - z_{11} ^2}{G_{\text{шд}}  z_{21} ^2 \nabla R_{\text{ш}}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} - \frac{(Z_{\text{кор}} - z_{11}) R_{\text{ш}}}{G_{\text{шд}}  z_{21} ^2 \nabla R_{\text{ш}}}$
			$G_{\text{шд}}^{(p)} = G_{\text{шд}}$ $R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}}$

Таблица 6.29

№ пл.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}} + \frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}(z_{11} - z_{21} + Z_1) + R_{\text{ш3}}(z_{11} + Z_1 + Z_2)}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}} + \frac{G_{\text{ш2}} G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}(y_{11} + Y_1 - y_{21}) + (y_{11} + Y_1 + Y_2) G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}} + \frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}{ Z_2(h_{21} - 1) + h_{21} Z_3 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}(h_{11} - h_{21} Z_3 + Z_1) + R_{\text{ш3}}[h_{11} + \rightarrow + (h_{21} + 1)Z_2 + Z_1]}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}$

Продолжение табл. 6.29

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
4		$G_{шн}^{(p)}$	$G_{ш1} + \frac{G_{ш2} G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}}$
		$R_{шa}^{(p)}$	$\frac{G_{ш2} + G_{ш3}}{ Y_2 (f_{21} - 1) + f_{21} Y_3 ^2}$
		$Y_{kop}^{(p)}$	$\frac{G_{ш2} (f_{11} + Y_1 - Y_3 f_{21}) + G_{ш3} [f_{11} + Y_1 + \rightarrow + Y_2 (1 + f_{21})]}{G_{ш2} + G_{ш3}}$
5		$R_{шн}^{(p)}$	$R_{ш1} + \frac{R_{ш2} R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}}$
		$G_{шa}^{(p)}$	$\frac{R_{ш2} + R_{ш3}}{ Z_2 ^2}$
		$Z_{kop}^{(p)}$	$Z_1 + \frac{Z_2 R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}}$
6		$G_{шн}^{(p)}$	$G_{ш1} + \frac{G_{ш2} G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}}$
		$R_{шa}^{(p)}$	$\frac{G_{ш2} G_{ш3}}{ Y_2 ^2}$
		$Y_{kop}^{(p)}$	$Y_1 + \frac{Y_2 G_{ш3}}{G_{ш2} + G_{ш3}}$

Таблица 6.30

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{коп}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}} (z_{11} - z_{21} + Z_1) + R_{\text{ш3}} (z_{11} + Z_1 + Z_2)}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}} G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{коп}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}} (y_{11} - y_{21} + Y_1) + G_{\text{ш3}} (y_{11} + Y_1 + Y_2)}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}{ Z_2 (h_{21} - 1) + h_{21} Z_3 ^2}$
		$Z_{\text{коп}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}} (h_{11} - h_{21} Z_3 + Z_1) + R_{\text{ш3}} [h_{11} + \rightarrow}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}} \rightarrow (h_{21} + 1) Z_2 + Z_1]$

Продолжение табл. 6.30

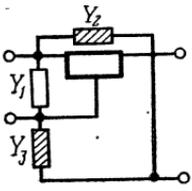
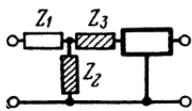
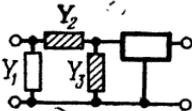
№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}} G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$
		$R_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}{ Y_2 (f_{21} - 1) + f_{21} Y_3 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}} (f_{11} - f_{21} Y_3 + Y_1) + G_{\text{ш3}} [f_{11} + \rightarrow + (f_{21} + 1) Y_2 + Y_1]}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$
5		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}$
		$G_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}{ Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1 + \frac{Z_2 R_{\text{ш3}}}{R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}}$
6		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}} G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$
		$R_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}{ Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1 + \frac{Y_2 G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$

Таблица 6.31

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш3}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1 + Z_2$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш3}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1 + Y_2$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш3}}}{ Z_2 (h_{21} - 1) + h_{21} Z_3 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$h_{11} + Z_2 (h_{21} + 1) + Z_1$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш3}}}{ Y_2 (f_{21} - 1) + f_{21} Y_3 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$f_{11} + (f_{21} + 1) Y_2 + Y_1$
5		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш3}}}{ Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1 + Z_2$
6		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш3}}}{ Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1 + Y_2$

Таблица 6.32

№ шп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} - z_{21} + Z_1$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} - y_{21} + Y_1$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ Z_2 (h_{21} - 1) + h_{21} Z_3 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$h_{11} - h_{21} Z_3 + Z_1$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ Y_2 (f_{21} - 1) + Y_3 f_{21} ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$f_{11} + Y_1 - f_{21} Y_3$
5		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ Z_3 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1$
6		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1$

Таблица 6.33

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{шз}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1 + Z_2$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{шз}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1 + Y_2$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{шз}}}{ Z_2 (h_{21} - 1) + h_{22} Z_3 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$h_{11} + (h_{21} + 1) Z_2 + Z_1$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{шз}}}{ Y_2 (f_{21} - 1) + f_{21} Y_3 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$f_{11} + (f_{21} + 1) Y_2 + Y_1$
5		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{шз}}}{ Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1 + Z_2$
6		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{шз}}}{ Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1 + Y_2$

Таблица 6.34

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{коп}}^{(p)}$	$z_{11} - z_{21} + Z_1$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{коп}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1 - y_{21}$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ Z_2 (h_{21} - 1) + h_{21} Z_3 ^2}$
		$Z_{\text{коп}}^{(p)}$	$h_{11} - h_{21} Z_3 + Z_1$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ Y_2 (f_{21} - 1) + f_{21} Y_3 ^2}$
		$Y_{\text{коп}}^{(p)}$	$f_{11} - f_{21} Y_3 + Y_1$
5		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{коп}}^{(p)}$	$Z_1$
6		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{коп}}^{(p)}$	$Y_1$

Таблица 6.35

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1 + Z_2$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1 + Y_2$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$h_{11} + Z_1 + Z_2 (h_{21} + 1)$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$f_{11} + Y_1 + Y_2 (f_{21} + 1)$
5		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1 + Z_2$
6		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1 + Y_2$

Таблица 6.36

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1 + Z_2$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1 + Y_2$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$h_{11} + Z_1 + Z_2 \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3}$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$f_{11} + Y_1 + Y_2 \frac{Y_3}{Y_2 + Y_3}$
5		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1 + Z_2 \left( 1 - \frac{Z_2}{z_{11} + Z_2 + Z_3} \right)$
6		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1 + Y_2 \left( 1 - \frac{Y_2}{y_{11} + Y_2 + Y_3} \right)$

Таблица 6.37

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} - z_{21} + Z_1$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} - y_{21} + Y_1$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1$

Таблица 6.38

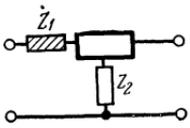
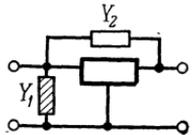
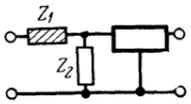
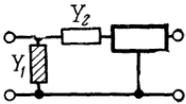
№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1 + Z_2$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1 + Y_2$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1 + Z_2 \frac{z_{11}}{z_{11} + Z_2}$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1 + Y_2 \frac{y_{11}}{y_{11} + Y_2}$

Таблица 6.39

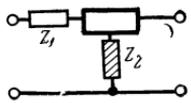
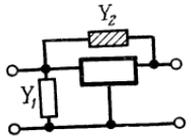
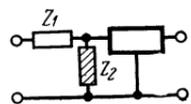
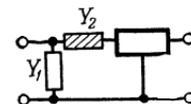
№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ z_{21} + Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} - z_{21} + Z_1$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ y_{21} + Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} - y_{21} + Y_1$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ Y_2 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1$

Таблица 6.40

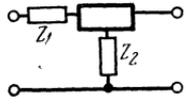
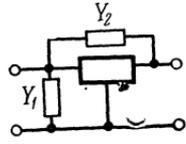
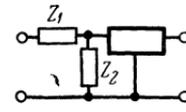
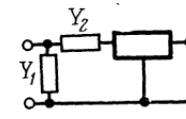
№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1 + Z_2$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1 + Y_2$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1 + Z_2 \frac{z_{11}}{z_{11} + Z_2}$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1 + Y_2 \frac{y_{11}}{y_{11} + Y_2}$

Таблица 6.41

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{шн}^{(p)}$	$\frac{R_{ш1} R_{ш2}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$
		$G_{ша}^{(p)}$	$\frac{R_{ш1} + R_{ш2}}{ z_{21} + Z_1 ^2}$
		$Z_{кор}^{(p)}$	$\frac{R_{ш1} (z_{11} - z_{21}) + R_{ш2} (z_{11} + Z_1)}{R_{ш1} + R_{ш2}}$
2		$G_{шн}^{(p)}$	$\frac{G_{ш1} G_{ш2}}{G_{ш1} + G_{ш2}}$
		$R_{ша}^{(p)}$	$\frac{G_{ш1} + G_{ш2}}{ y_{21} + Y_1 ^2}$
		$Y_{кор}^{(p)}$	$\frac{G_{ш1} (y_{11} - y_{21}) + G_{ш2} (y_{11} + Y_2)}{G_{ш1} + G_{ш2}}$
3		$R_{шн}^{(p)}$	$\frac{R_{ш1} R_{ш2}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$
		$G_{ша}^{(p)}$	$\frac{R_{ш1} + R_{ш2}}{ Z_1 (h_{21} - 1) + h_{21} Z_2 ^2}$
		$Z_{кор}^{(p)}$	$\frac{R_{ш1} (h_{11} - h_{21} Z_2) + R_{ш2} [h_{11} + (h_{21} + 1) Z_1]}{R_{ш1} + R_{ш2}}$
4		$G_{шн}^{(p)}$	$\frac{G_{ш1} G_{ш2}}{G_{ш1} + G_{ш2}}$
		$R_{ша}^{(p)}$	$\frac{G_{ш1} + G_{ш2}}{ (f_{21} - 1) Y_2 + f_{21} Y_3 ^2}$
		$Y_{кор}^{(p)}$	$\frac{G_{ш1} (f_{11} - f_{21} Y_2) + G_{ш2} [f_{11} + (f_{21} + 1) Y_1]}{G_{ш1} + G_{ш2}}$
5		$R_{шн}^{(p)}$	$\frac{R_{ш1} R_{ш2}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$
		$G_{ша}^{(p)}$	$\frac{R_{ш1} + R_{ш2}}{ Z_1 ^2}$
		$Z_{кор}^{(p)}$	$\frac{Z_1 R_{ш2}}{R_{ш1} + R_{ш2}}$
6		$G_{шн}^{(p)}$	$G_{ш1} \frac{G_{ш2}}{G_{ш1} + G_{ш2}}$
		$R_{ша}^{(p)}$	$\frac{G_{ш1} + G_{ш2}}{ Y_1 ^2}$
		$Y_{кор}^{(p)}$	$Y_1 \frac{G_{ш2}}{G_{ш1} + G_{ш2}}$

Таблица 6.42

№ шп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш1}}}{ z_{21} + Z_1 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} - z_{21}$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш1}}}{ y_{21} + Y_1 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} - y_{21}$
3		$\dot{R}_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш1}}}{ Z_1(h_{21}-1) + h_{21}Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$h_{11} - h_{21}Z_2$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш1}}}{ (f_{21}-1)Y_2 + f_{21}Y_3 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$f_{11} - f_{21}Y_2$
5		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш1}}}{ Z_1 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	—
6		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш1}}}{ Y_1 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	—

Таблица 6.43

№ шп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ z_{21} + Z_1 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ y_{21} + Y_1 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ Z_1(h_{21} - 1) + h_{21}Z_2 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$h_{11} + (h_{21} + 1)Z_1$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ (f_{21} - 1)Y_2 + f_{21}Y_3 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$f_{11} + (f_{21} + 1)Y_1$
5		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ Z_1 ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1$
6		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ Y_1 ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1$

Таблица 6.44

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$h_{11} + Z_1 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$f_{11} + Y_1 \frac{Y_2}{Y_1 + Y_2}$
5		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_1 \frac{z_{11}}{z_{11} + Z_2}$
6		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_1 \frac{y_{11}}{y_{11} + Y_2}$

Таблица 6.45

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1$
2		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ y_{21} ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1$
3		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш1}}$
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш2}}}{ y_{21} ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y_1$

Таблица 6.46

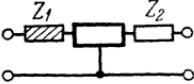
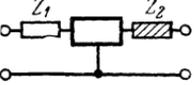
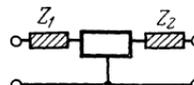
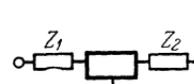
№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{коп}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1$
2		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ z_{21} ^2}$
		$Z_{\text{коп}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1$
3		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш1}}$
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{ z_{21} ^2}$
		$Z_{\text{коп}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1$
4		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{коп}}^{(p)}$	$z_{11} + Z_1$

Таблица 6.47

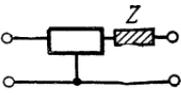
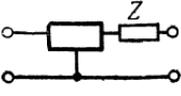
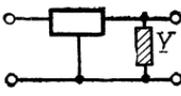
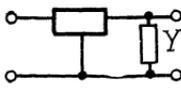
№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш}}}{ z_{21} ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11}$
2		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{шз}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11}$
3		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{шз}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш}}}{ y_{21} ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11}$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{шз}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11}$

Таблица 6.48

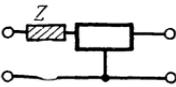
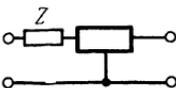
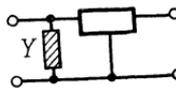
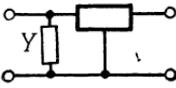
№ шп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{ш}}$
		$G_{\text{шд}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z$
2		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{шд}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z$
3		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{ш}}$
		$R_{\text{шд}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{шд}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y$

Таблица 6.49

№ пп.	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
1		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ш}}}{ z_{21} + Z ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} - z_{21}$
2		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$G_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$z_{11} + Z$
3		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ш}}}{ y_{21} + Y ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} - y_{21}$
4		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	—
		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	—
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$y_{11} + Y$

Наконец, разберем как особый случай соединение бесшумных составного и неделимого четырехполюсников. Реактивные цепи в общем случае влияют на отношение сигнал/шум, хотя сами они и не содержат источников флуктуаций. В них корреляционное со-противление или проводимость шума вырождаются в соответствующие сигнальные величины. Шумовые параметры полных соединений приведены в табл. 6.36.

## 6.5. СОЕДИНЕНИЯ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА С ТРАНСФОРМАТОРОМ

Соединение шумящего четырехполюсника с трансформатором (слева) изображено на рис. 6.3. Оно пред-

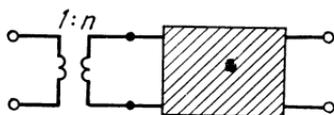


Рис. 6.3. Соединение идеально-го трансформатора с недели-мым шумящим четырехполюс-ником

ставляет собой частный слу-чай ступенчатого соединения двух четырехполюсников, один из которых бесшумный (для простоты выбран иде-альный трансформатор), второй — шумящий четы-рехполюсник.

Сигнальные параметры первого четырехполюсника— идеального трансформатора — находим в табл. П.9:  $a_{11}^{(1)} = \pm 1/n$ ,  $a_{12}^{(1)} = 0$ ,  $a_{21}^{(1)} = 0$ ,  $a_{22}^{(1)} = \pm n$ , а шумовые пара-метры второго примем:  $G_{ша}^{(2)} = G_{ша}$ ,  $R_{шн}^{(2)} = R_{шн}$  и  $Z_{кор}^{(2)} = Z_{кор}$ . Подставив те и другие в формулы  $A_z$  табл. 6.2, получим:

$$R_{шн}^{(p)} = R_{шн}/n^2, \quad (6.1)$$

$$G_{ша}^{(p)} = n^2 G_{ша}, \quad (6.2)$$

$$Z_{кор}^{(p)} = Z_{кор}/n^2 \quad (6.3)$$

и по аналогии для второй системы первичных шумовых параметров  $R_{ша}^{(2)} = R_{ша}$ ,  $G_{шн}^{(2)} = G_{шн}$ ,  $Y_{кор}^{(2)} = Y_{кор}$  найдем

$$G_{шн}^{(p)} = n^2 G_{шн}, \quad (6.4)$$

$$R_{ша}^{(p)} = R_{ша}/n^2, \quad (6.5)$$

$$Y_{кор}^{(p)} = n^2 Y_{кор}. \quad (6.6)$$

Используя формулы табл. 4.4—4.7, определим форму-лы трансформации шумовых параметров некоторых из наиболее распространенных составных четырехполюсников, сведенные в табл. 6.50—6.51. Следуя изложенной методике, можно найти результирующие шумовые пара-

Таблица 6.50

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	
		сигнальные	шумовые
1			$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш1}}(R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}) + R_{\text{ш2}}R_{\text{ш3}}}{n^2 (R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}})}$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 (R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}})}{ Z_2 ^2}$ $Z_{\text{коп}}^{(p)} = \frac{Z_1(R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}) + Z_2R_{\text{ш3}}}{n^2 (R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}})}$
2		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1 + Z_1 Y_2}{n}$ $a_{12}^{(p)} = \pm \frac{Z_1 + Z_3 + Z_1 Y_2 Z_3}{n}$	$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш1}}}{n^2}$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 R_{\text{ш3}}}{ Z_2 ^2}$ $Z_{\text{коп}}^{(p)} = \frac{Z_1 + Z_2}{n^2}$
3		$a_{21}^{(p)} = \pm n Y_2$ $a_{22}^{(p)} = \pm n (1 + Y_2 Z_3)$	$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш2}} R_{\text{ш3}}}{n^2 (R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}})}$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 (R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}})}{ Z_2 ^2}$ $Z_{\text{коп}}^{(p)} = \frac{Z_1 (R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}}) Z_2 R_{\text{ш3}}}{n^2 (R_{\text{ш2}} + R_{\text{ш3}})}$
4			$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш1}}}{n^2}$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 R_{\text{ш2}}}{ Z_2 ^2}$ $Z_{\text{коп}}^{(p)} = \frac{Z_1}{n^2}$
5			$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш1}}}{n^2}$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = 0$ $Z_{\text{коп}}^{(p)} = \frac{Z_1 + Z_2}{n^2}$

Продолжение табл. 6.50

№ шл.	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	
		сигнальные	шумовые
6		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1 + Z_1 Y_2}{n}$ $a_{12}^{(p)} = \pm \frac{Z_1 + Z_3 + Z_1 Y_2 Z_3}{n}$	$R_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 R_{\text{ш3}}}{ Z_2 ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = \frac{Z_1 + Z_2}{n^2}$
7		$a_{21}^{(p)} = \pm n Y_2$ $a_{22}^{(p)} = \pm n (1 + Y_2 Z_3)$	$R_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 R_{\text{ш2}}}{ Z_2 ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = \frac{Z_1}{n^2}$
8			$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш1}}}{n^2}$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 R_{\text{ш2}}}{ Z_2 ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = \frac{Z_1}{n^2}$
9		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1 + Z_1 Y_2}{n}$ $a_{12}^{(p)} = \pm \frac{Z_1}{n}$ $a_{21}^{(p)} = \pm n Y_2$ $a_{22}^{(p)} = \pm n$	$R_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 R_{\text{ш2}}}{ Z_2 ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = \frac{Z_1}{n^2}$
10			$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш1}}}{n^2}$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = 0$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = \frac{Z_1 + Z_2}{n^2}$

Продолжение табл. 6.50

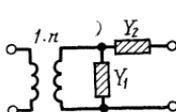
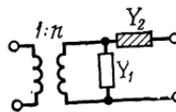
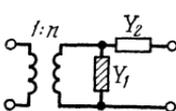
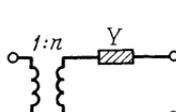
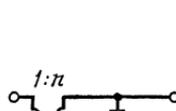
№ ш.	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	
		сигнальные	шумовые
11			$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш1}} R_{\text{ш2}}}{n^2 (R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}})}$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 (R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}})}{ Z_1 ^2}$ $Z_{\text{коп}}^{(p)} = \frac{Z_1 R_{\text{ш2}}}{n^2 (R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}})}$
12		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1}{n}$ $a_{12}^{(p)} = \pm \frac{Z_2}{n}$ $a_{21}^{(p)} = \pm n Y_1$ $a_{22}^{(p)} = \pm n(1 + Y_1 Z_2)$	$R_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 R_{\text{ш2}}}{ Z_2 ^2}$ $Z_{\text{коп}}^{(p)} = \frac{Z_1}{n^2}$
13			$R_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 R_{\text{ш1}}}{ Z_1 ^2}$ $Z_{\text{коп}}^{(p)} = 0$
14		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1}{n}$ $a_{12}^{(p)} = \pm \frac{Z}{n}$ $a_{21}^{(p)} = 0$ $a_{22}^{(p)} = \pm n$	$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{ш}}}{n^2}$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = 0$ $Z_{\text{коп}}^{(p)} = \frac{Z}{n^2}$
15		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1}{n}$ $a_{12}^{(p)} = 0$ $a_{21}^{(p)} = \pm n Y$ $a_{22}^{(p)} = \pm n$	$R_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $G_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{n^2 R_{\text{ш}}}{ Z ^2}$ $Z_{\text{коп}}^{(p)} = 0$

Таблица 6.51

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	
		сигнальные	шумовые
1			$G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{n^2 [G_{\text{ш1}}(G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}) + G_{\text{ш2}} G_{\text{ш3}}]}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}{n^2  Y_2 ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = \frac{n^2 [Y_1 (G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}) + Y_2 G_{\text{ш3}}]}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$
2		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1 + Z_2 Y_3}{n}$	$G_{\text{шн}}^{(p)} = n^2 G_{\text{ш1}}$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш3}}}{n^2  Y_2 ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = n^2 (Y_1 + Y_2)$
3		$a_{12}^{(p)} = \pm \frac{Z_2}{n}$ $a_{21}^{(p)} = \pm n(Y_1 + Y_3 + Y_1 Z_2 Y_3)$ $a_{22}^{(p)} = \pm n(1 + Y_1 Z_2)$	$G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{n^2 G_{\text{ш2}} G_{\text{ш3}}}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}{n^2  Y_2 ^2}$ $Z_{\text{кор}}^{(p)} = \frac{n^2 [Y_1 (G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}) + Y_2 G_{\text{ш3}}]}{G_{\text{ш2}} + G_{\text{ш3}}}$
4			$G_{\text{шн}}^{(p)} = n^2 G_{\text{ш1}}$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш2}}}{n^2  Y_2 ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = n^2 Y_1$
5			$G_{\text{шн}}^{(p)} = n^2 G_{\text{ш1}}$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = 0$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = n^2 (Y_1 + Y_2)$

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	
		сигнальные	шумовые
6		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1 + Z_2 Y_3}{n}$ $a_{12}^{(p)} = \pm \frac{Z_2}{n}$	$G_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш3}}}{n^2  Y_2 ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = n^2 (Y_1 + Y_2)$
7		$a_{21}^{(p)} = \pm n (Y_1 + Y_3 + Y_1 Z_2 Y_3)$ $a_{22}^{(p)} = \pm n (1 + Y_1 Z_2)$	$G_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш2}}}{n^2  Y_2 ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = n^2 Y_1$
8		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1 + Z_1 Y_2}{n}$ $a_{12}^{(p)} = \pm \frac{Z_1}{n}$	$G_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{n^2 G_{\text{ш1}} G_{\text{ш2}}}{G_{\text{ш1}} + G_{\text{ш2}}}$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш1}} + G_{\text{ш2}}}{n^2  Y_1 ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = \frac{n^2 Y_1 G_{\text{ш2}}}{G_{\text{ш1}} + G_{\text{ш2}}}$
9		$a_{21}^{(p)} = \pm n Y_2$ $a_{22}^{(p)} = \pm n$	$G_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш2}}}{n^2  Y_1 ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = n^2 Y_1$
10			$G_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш1}}}{n^2  Y_1 ^2}$ $Y_{\text{кор}}^{(p)} = 0$

Продолжение табл. 6.51

№ пп.	Схема соединения	Формулы результирующих параметров	
		сигнальные	шумовые
11			$G_{\text{шн}}^{(p)} = n^2 G_{\text{ш1}}$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш2}}}{n^2  Y_2 ^2}$ $Y_{\text{коп}}^{(p)} = n^2 Y_1$
12		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1}{n}$ $a_{12}^{(p)} = \pm \frac{Z_2}{n}$ $a_{21}^{(p)} = \pm n Y_1$ $a_{22}^{(p)} = \pm n (1 + Y_1 Z_2)$	$G_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш2}}}{n^2  Y_2 ^2}$ $Y_{\text{коп}}^{(p)} = n^2 Y_1$
13			$G_{\text{шн}}^{(p)} = n^2 G_{\text{ш1}}$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = 0$ $Y_{\text{коп}}^{(p)} = n^2 (Y_1 + Y_2)$
14		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1}{n}$ $a_{12}^{(p)} = \pm \frac{Z}{n}$ $a_{21}^{(p)} = 0$ $a_{22}^{(p)} = \pm n$	$G_{\text{шн}}^{(p)} = 0$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш}}}{n^2  Y ^2}$ $Y_{\text{коп}}^{(p)} = 0$
15		$a_{11}^{(p)} = \pm \frac{1}{n}$ $a_{12}^{(p)} = 0$ $a_{21}^{(p)} = \pm n Y$ $a_{22}^{(p)} = \pm n$	$G_{\text{шн}}^{(p)} = n^2 G_{\text{ш}}$ $R_{\text{ша}}^{(p)} = 0$ $Y_{\text{коп}}^{(p)} = n^2 Y$

метры и других соединений шумящего четырехполюсника с идеальным трансформатором. Последний можно заменить реальным трансформатором, шумовые параметры которого несложно получить из формул табл. 4.4—4.7, а сигнальные взять готовыми из табл. П.9.

## 6.6. РЕГУЛЯРНЫЕ И НЕРЕГУЛЯРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Приведенные формулы для соединений шумящих четырехполюсников получены для цепей, удовлетворяющих условиям регулярности [14, 35], когда внешние токи всех составляющих подчиняются условиям  $i_{01}^{(s)} = i_1^{(s)}$ ,  $i_{02}^{(s)} = i_2^{(s)}$ , где  $i_{01}^{(s)}$  и  $i_{02}^{(s)}$  — токи в «нижних» выводах  $s$ -го шумящего четырехполюсника ( $s = 1, 2, 3, \dots$ ), и, наоборот, нерегулярности, если справедливы неравенства:  $i_{01}^{(s)} \neq i_1^{(s)}$ ,  $i_{02}^{(s)} \neq i_2^{(s)}$ . Таким образом, прежде чем применить к соединению ту или иную формулу, необходимо удостовериться в его регулярности.

Не останавливаясь подробно на известных вопросах регулярности, ограничимся типичными примерами регулярных и нерегулярных соединений четырехполюсников.

К нерегулярным соединениям, образованным двумя шумящими четырехполюсниками, относятся: последовательное соединение четырехполюсников, имеющих общий вывод (рис. 6.4а); последовательно-параллельное соединение четырехполюсников с общим выводом (рис. 6.4б); параллельно-последовательное соединение четырехполюсников, имеющих общие выводы (рис. 6.4в); последовательное соединение четырехполюсников, один из которых имеет общий вывод (рис. 6.4г); параллельное соединение четырехполюсников, один из которых имеет общий вывод (рис. 6.4д); последовательно-параллельное соединение четырехполюсников, один из которых имеет общий вывод (рис. 6.4е); параллельно-последовательное соединение четырехполюсников, один из которых имеет общий вывод (рис. 6.4ж); параллельное соединение двух разрывных четырехполюсников и двухполюсников (рис. 6.4з), если выполняется неравенство  $Z_1^{(1)} Z_2^{(2)} \neq Z_1^{(2)} Z_2^{(1)}$ .

К регулярным соединениям, образованным двумя и более шумящими четырехполюсниками относятся: последовательное соединение двух четырехполюсников, имеющих общий вывод (рис. 6.5а); параллельное соединение любого  $n$  числа четырехполюсников с общим выводом (рис. 6.5б); последовательно-параллельное соединение

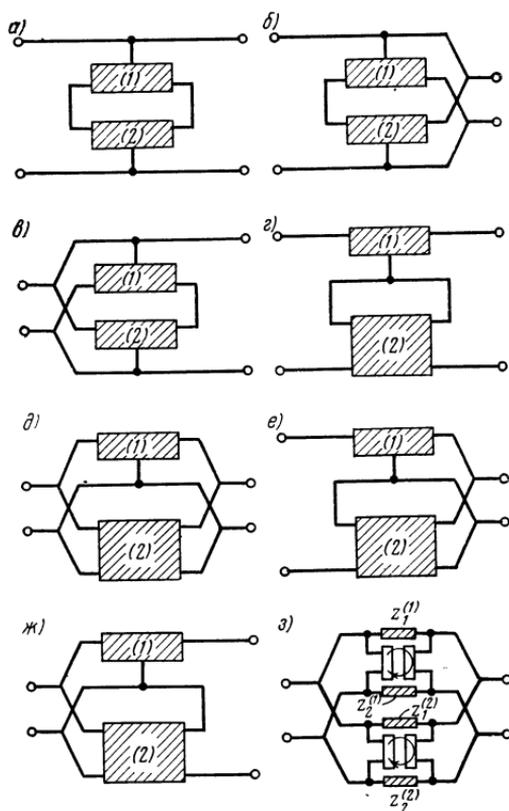


Рис. 6.4. Нерегулярные соединения шумящих четырехполюсников

двух четырехполюсников, имеющих общий вывод (рис. 6.5в); параллельно-последовательное соединение двух четырехполюсников с общим выводом (рис. 6.5г); последовательное соединение любого  $\mu$  числа четырехполюсников с общими выводами, развязанных справа разрывным элементом (рис. 6.5д); параллельно-последовательное соединение любого  $\mu$  числа четырехполюсников с общими выводами, развязанных справа разрывным элементом (рис. 6.5е); последовательно-параллельное соединение любого  $\mu$  числа четырехполюсников с общими выводами, развязанных слева разрывным элементом (рис. 6.5ж); последовательно-параллельное соединение любого  $\mu$  числа разрывных четырехполюсников с параллельно включенными двухполюсниками, развязанных разрывным элементом слева (рис. 6.5з).

Как следует из приведенных наиболее типичных соединений, регулярности во многих случаях удается достичь включением разрывных четырехполюсников. По-

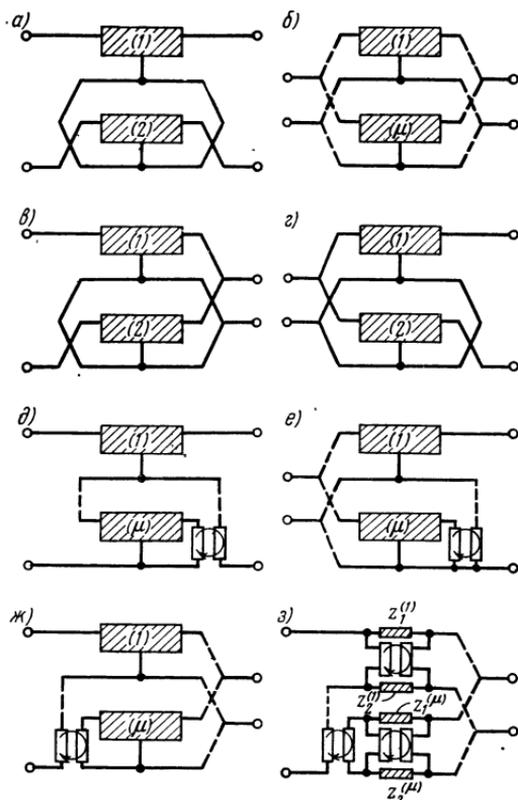


Рис. 6.5. Регулярные соединения шумящих четырехполюсников

следние в традиционных понятиях являются ничем иным как трансформаторами и в перспективе развития микроэлектроники представляются элементами, работающими, к примеру, на электронно-оптических эффектах.

## ШУМЯЩАЯ СИСТЕМА

## 7.1. ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ

**Ш**умящая система в обобщенном виде представляет четырехполюсник, к которому подключен источник сигнала  $\dot{E}_c$  с внутренним сопротивлением  $Z_1$  и нагрузка  $Z_2$  — при передаче слева направо (рис. 7.1а) или источник

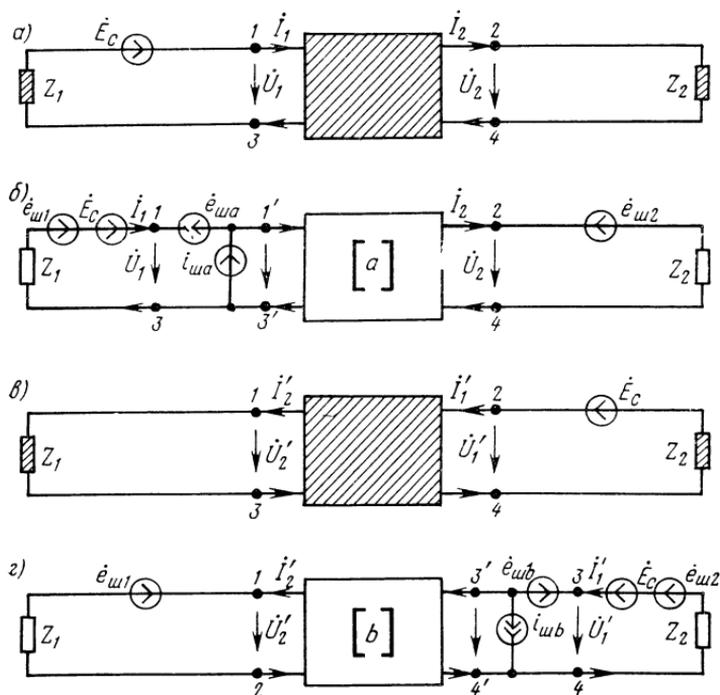


Рис. 7.1. Шумящая система при передаче сигнала слева направо (а), с вынесенными источниками шума (б), при передаче справа налево (в), с вынесенными источниками шума (г)

сигнала с внутренним сопротивлением  $Z_2$  и нагрузка  $Z_1$  — при передаче справа налево (рис. 7.1в). При подключении к четырехполюснику источника сигнала спра-

ва во внешних цепях изменяются направления токов, принятые направления напряжений сохраняются (те и другие помечены штрихом сверху) [6.35].

В отличие от идеальной (бесшумной) системы, составляющей предмет изучения теории линейных электрических цепей, в шумящей системе, кроме сигнала, учитываются еще и внутренние флуктуации составляющих: источника сигнала, четырехполюсника и нагрузки. Это позволяет установить крайне важные в теоретическом и практическом отношении зависимости между передаваемым сигналом и внутренними шумами, выяснить возможности уменьшения влияния последних на шумозащищенность передачи и при необходимости оценить воздействие помех внешнего происхождения.

Образующие систему составляющие преимущественно представляют собой полиэлементные структуры с несколькими или многими источниками флуктуаций. В этом случае они по изложенной выше методике приводятся к результирующим двухполюсникам, четырехполюсникам с эквивалентными источниками шума, тем самым задача неизменно сводится к рассмотрению системы обобщенного вида.

## 7.2. ШУМОВЫЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ

Во внешних цепях входящего в систему четырехполюсника протекают токи и возникают напряжения, обусловленные всеми вместе взятыми источниками — сигнала  $\dot{E}_c$ , шумов  $\dot{e}_{ш1}$  и  $\dot{e}_{ш2}$ , учитывающими флуктуации соответственно в сопротивлениях  $Z_1$  и  $Z_2$ ,  $\dot{e}_{ша}$  и  $\dot{i}_{ша}$  (или другими им эквивалентными), отображающими внутренние флуктуации четырехполюсника (рис. 7.1б и г). Исходя из этого, определим результирующие токи и напряжения:

— при передаче слева направо:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{c11} + \dot{I}_{ш11} + \dot{I}_{шч1} + \dot{I}_{ш21}, \quad (7.1)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{c11} + \dot{U}_{ш11} + \dot{U}_{шч1} + \dot{U}_{ш21}, \quad (7.2)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{c12} + \dot{I}_{ш12} + \dot{I}_{шч2} + \dot{I}_{ш22}, \quad (7.3)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{c12} + \dot{U}_{ш12} + \dot{U}_{шч2} + \dot{U}_{ш22}; \quad (7.4)$$

— при передаче справа налево:

$$\dot{I}'_1 = \dot{I}'_{c11} + \dot{I}'_{ш12} + \dot{I}'_{шч2} + \dot{I}'_{ш22}, \quad (7.5)$$

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}'_{c11} + \dot{U}'_{ш12} + \dot{U}'_{шч2} + \dot{U}'_{ш22}, \quad (7.6)$$

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}'_{c12} + \dot{I}'_{ш11} + \dot{I}'_{шч1} + \dot{I}'_{ш22}, \quad (7.7)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}'_{c12} + \dot{U}'_{ш11} + \dot{U}'_{шч1} + \dot{U}'_{ш22}, \quad (7.8)$$

где  $\dot{I}'_{c11}$ ,  $\dot{U}'_{c11}$ ,  $\dot{I}'_{c12}$ ,  $\dot{U}'_{c12}$  и  $\dot{I}'_{c11}$ ,  $\dot{U}'_{c11}$ ,  $\dot{I}'_{c12}$ ,  $\dot{U}'_{c12}$  — токи и напряжения от источника сигнала  $\dot{E}_c$  при подключении его слева и справа;  $\dot{I}'_{ш11}$ ,  $\dot{U}'_{ш11}$  и  $\dot{I}'_{ш12}$ ,  $\dot{U}'_{ш12}$  — шумовые токи и напряжения от источника  $\dot{e}_{ш1}$ ;  $\dot{I}'_{шч1}$ ,  $\dot{U}'_{шч1}$  и  $\dot{I}'_{шч2}$ ,  $\dot{U}'_{шч2}$  — шумовые токи и напряжения от источников  $\dot{e}_{ша}$  и  $\dot{i}_{ша}$  или  $\dot{e}_{шb}$  и  $\dot{i}_{шb}$ ;  $\dot{I}'_{ш21}$ ,  $\dot{U}'_{ш21}$  и  $\dot{I}'_{ш22}$ ,  $\dot{U}'_{ш22}$  — шумовые токи и напряжения от источника  $\dot{e}_{ш2}$ .

Источники сигнала и шума статистически независимы, поэтому порождаемые ими во внешних цепях токи и напряжения подчиняются принципу наложения. Соотношения между сигнальными токами и напряжениями, определяемые согласно теории неавтономного четырехполюсника, для различных систем параметров приведены в табл. П.10—П.11. Соотношения между шумовыми токами и напряжениями найдем, пользуясь теорией автономного четырехполюсника [35, 83]. Предварительно определим составляющие шумовых токов и напряжений в (7.1)—(7.8):

— от источника  $\dot{e}_{ш1}$  по формулам табл. П.10:

$$\dot{I}'_{ш11} = -\frac{a_{21}Z_2 + a_{22}}{H_a} \dot{e}_{ш1}, \quad \dot{U}'_{ш11} = \frac{a_{11}Z_2 + a_{12}}{H_a} \dot{e}_{ш1}, \quad (7.9)$$

$$\dot{I}'_{ш12} = -\frac{1}{H_a} \dot{e}_{ш1}, \quad \dot{U}'_{ш12} = \frac{Z_2}{H_a} \dot{e}_{ш1}; \quad (7.10)$$

— от источника  $\dot{e}_{ш2}$  по формулам табл. П.11:

$$\dot{I}'_{ш21} = -\frac{\Delta a}{H_a} \dot{e}_{ш2}, \quad \dot{U}'_{ш21} = \frac{\Delta^* a Z_1}{H_a} \dot{e}_{ш2}, \quad (7.11)$$

$$\dot{I}'_{ш22} = -\frac{a_{21}Z_1 + a_{11}}{H_a} \dot{e}_{ш2}, \quad \dot{U}'_{ш22} = \frac{a_{22}Z_1 + a_{12}}{H_a} \dot{e}_{ш2}; \quad (7.12)$$

— от источников  $\dot{e}_{ша}$  и  $\dot{i}_{ша}$  по формулам табл. П.10 и П.11:

$$\dot{I}'_{шч1} = -\frac{\dot{e}_{ша}(a_{21}Z_2 + a_{22}) - \dot{i}_{ша}(a_{11}Z_2 + a_{12})}{H_a}, \quad (7.13)$$

$$\dot{U}'_{шч1} = \frac{Z_1[(a_{21}Z_2 + a_{22})\dot{e}_{ша} - (a_{11}Z_2 + a_{12})\dot{i}_{ша}]}{H_a}, \quad (7.14)$$

$$i_{\text{ш2ч}} = - \frac{\dot{e}_{\text{ш}a} + Z_1 i_{\text{ш}a}}{H_a}, \quad (7.15)$$

$$\dot{U}_{\text{ш2ч}} = - \frac{Z_2 (\dot{e}_{\text{ш}a} + Z_1 i_{\text{ш}a})}{H_a}. \quad (7.16)$$

Используя далее соотношения (7.9) — (7.16), определим суммарные шумовые токи и напряжения:

— от источников  $e_{\text{ш1}}$  и  $e_{\text{ш2}}$ :

$$\dot{U}_{\text{ш1}} = \frac{(a_{11} Z_2 + a_{12}) \dot{e}_{\text{ш1}} + \Delta a Z_1 \dot{e}_{\text{ш2}}}{H_a}, \quad (7.17)$$

$$i_{\text{ш1}} = \frac{(a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{\text{ш1}} - \Delta a \dot{e}_{\text{ш2}}}{H_a}, \quad (7.18)$$

$$\dot{U}_{\text{ш2}} = \frac{Z_2 \dot{e}_{\text{ш1}} + (a_{22} Z_1 + a_{12}) \dot{e}_{\text{ш2}}}{H_a}, \quad (7.19)$$

$$i_{\text{ш2}} = \frac{\dot{e}_{\text{ш1}} - (a_{21} Z_1 + a_{11}) \dot{e}_{\text{ш2}}}{H_a}, \quad (7.20)$$

— от источников  $e_{\text{шa}}$ ,  $i_{\text{шa}}$  и  $i_{\text{ш}a}$ :

$$\dot{U}_{\text{ш1}} = \frac{Z_1 (a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{\text{шa}} - (a_{11} Z_2 + a_{12}) (Z_1 i_{\text{ш}a} - \dot{e}_{\text{ш1}})}{H_a}, \quad (7.21)$$

$$i_{\text{ш1}} = \frac{(a_{21} Z_2 + a_{22}) (\dot{e}_{\text{ш}a} - \dot{e}_{\text{ш1}}) - (a_{11} Z_2 + a_{12}) i_{\text{ш}a}}{H_a}, \quad (7.22)$$

$$\dot{U}_{\text{ш2}} = - \frac{Z_2 (\dot{e}_{\text{шa}} + Z_1 i_{\text{ш}a} - \dot{e}_{\text{ш1}})}{H_a}, \quad (7.23)$$

$$i_{\text{ш2}} = - \frac{\dot{e}_{\text{ш2}} + Z_1 i_{\text{ш}a} - \dot{e}_{\text{ш1}}}{H_a}; \quad (7.24)$$

— от источников  $e_{\text{шa}}$ ,  $i_{\text{шa}}$  и  $e_{\text{ш2}}$ :

$$\dot{U}_{\text{ш1}} = - \frac{Z_1 [(a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{\text{ш2}} - (a_{11} Z_2 + a_{12}) i_{\text{ш}a} + \Delta a \dot{e}_{\text{ш2}}]}{H_a}, \quad (7.25)$$

$$i_{\text{ш1}} = - \frac{(a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{\text{ш}a} - (a_{11} Z_2 + a_{12}) i_{\text{ш}a} + \Delta a \dot{e}_{\text{ш2}}}{H_a}, \quad (7.26)$$

$$\dot{U}_{\text{ш2}} = - \frac{Z_2 (\dot{e}_{\text{шa}} + Z_1 i_{\text{ш}a}) - (a_{22} Z_1 + a_{12}) \dot{e}_{\text{ш2}}}{H_a}, \quad (7.27)$$

$$i_{\text{ш2}} = - \frac{\dot{e}_{\text{ш}a} + Z_1 i_{\text{ш}a} + (a_{21} Z_1 + a_{11}) \dot{e}_{\text{ш2}}}{H_a}; \quad (7.28)$$

— от источников  $e_{\text{ш1}}$ ,  $e_{\text{шa}}$ ,  $i_{\text{шa}}$  и  $e_{\text{ш2}}$ :

$$\dot{U}_{\text{ш1}} = \frac{Z_1 [(a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{\text{ш}a} + \Delta a \dot{e}_{\text{ш2}}] - (a_{11} Z_2 + a_{12}) (Z_1 i_{\text{ш}a} - \dot{e}_{\text{ш1}})}{H_a}, \quad (7.29)$$

$$j_{ш1} = - \frac{(a_{21} Z_2 + a_{22})(\dot{e}_{шa} + \dot{e}_{ш1}) - (a_{11} Z_2 + a_{12}) i_{шa} + \Delta a \dot{e}_{ш2}}{H_a}, \quad (7.30)$$

$$U_{ш2} = - \frac{Z_2(\dot{e}_{шa} + Z_1 i_{шa} - \dot{e}_{ш1}) - (a_{22} Z_1 + a_{12}) \dot{e}_{ш2}}{H_a}, \quad (7.31)$$

$$i_{ш2} = - \frac{\dot{e}_{шa} + Z_1 i_{шa} - \dot{e}_{ш1} + (a_{21} Z_1 + a_{11}) \dot{e}_{ш2}}{H_a}. \quad (7.32)$$

Воспользовавшись соотношениями табл. 4.1, найдем выражения шумовых токов и напряжений во внешних цепях четырехполюсника в принятых системах параметров, которые сведены в табл. 7.1—7.7.

Подставив в (7.1)—(7.8) полученные результирующие шумовых величин (табл. 7.1—7.7), токи и напряжения, возникающие в системе от источника сигнала, при необходимости можно определить суммарные токи и напряжения для передачи слева направо и справа налево.

### 7.3. КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА

Обобщенные показатели шума системы, в отличие от четырехполюсника, отображают влияние на сигнал источников флуктуаций всех составляющих цепи, включая нагрузку. Используя полученные выше соотношения между шумовыми токами и напряжениями, выразим коэффициент шума системы через шумовые параметры составляющих. В качестве исходных примем выражения табл. 2.3, согласно которым коэффициент шума системы определяется по отношению полной мощности шума на нагрузке (от всех источников флуктуаций) к той ее части, которая обусловлена флуктуациями внутреннего сопротивления источника сигнала:

— при передаче слева направо

$$F_1 = \frac{P_{шs2}}{P_{шs12}}; \quad (7.33)$$

— при передаче справа налево

$$F_2 = \frac{P'_{шs1}}{P_{шs21}}, \quad (7.34)$$

где  $P_{шs2}$  и  $P'_{шs2}$  — кажущиеся мощности шума соответственно на нагрузках  $Z_2$  и  $Z_1$  от всех источников флуктуаций;  $P_{шs12}$  и  $P_{шs21}$  — кажущиеся мощности шума на

Таблица 7.1

№ сп.		
1a	$\dot{U}_{ш1} = \frac{1}{H_a} (a_{11} Z_2 + a_{12}) \dot{e}_{ш1}$	$i_{ш1} = \frac{1}{H_a} (a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{ш1}$
1b	$= \frac{1}{H_b} (b_{22} Z_2 - b_{12}) \dot{e}_{ш1}$	$= \frac{1}{H_b} (-b_{21} Z_2 + b_{11}) \dot{e}_{ш1}$
1h	$= \frac{1}{H_h} (-\Delta h Z_{ш2} + h_{11}) \dot{e}_{ш1}$	$= \frac{1}{H_h} (-h_{22} Z_2 + 1) \dot{e}_{ш1}$
1f	$= \frac{1}{H_f} (Z_2 - f_{22}) \dot{e}_{ш1}$	$= \frac{1}{H_f} (f_{11} Z_2 - \Delta f) \dot{e}_{ш1}$
1z	$= \frac{1}{H_z} (z_{11} Z_2 - \Delta z) \dot{e}_{ш1}$	$= \frac{1}{H_z} (Z_2 - z_{22}) \dot{e}_{ш1}$
1y	$= \frac{1}{H_y} (-y_{22} Z_2 + 1) \dot{e}_{ш1}$	$= \frac{1}{H_y} (-\Delta y Z_2 + y_{11}) \dot{e}_{ш1}$
2a	$\dot{U}_{ш2} = \frac{1}{H_a} Z_2 \dot{e}_{ш1}$	$i_{ш2} = \frac{1}{H_a} \dot{e}_{ш1}$
2b	$= \frac{1}{H_b} \Delta b Z_2 \dot{e}_{ш1}$	$= \frac{1}{H_b} \Delta b \dot{e}_{ш1}$
2h	$= \frac{1}{H_h} h_{21} Z_2 \dot{e}_{ш1}$	$= \frac{1}{H_h} h_{21} \dot{e}_{ш1}$
2f	$= \frac{1}{H_f} f_{21} Z_2 \dot{e}_{ш1}$	$= \frac{1}{H_f} f_{21} \dot{e}_{ш1}$
2z	$= \frac{1}{H_z} z_{21} Z_2 \dot{e}_{ш1}$	$= \frac{1}{H_z} z_{21} \dot{e}_{ш1}$
2y	$= \frac{1}{H_y} y_{21} Z_2 \dot{e}_{ш1}$	$= \frac{1}{H_y} y_{21} \dot{e}_{ш1}$

Таблица 7.2

№ пп.		
1a	$\dot{U}'_{ш1} = \frac{1}{H_a} (a_{22} Z_1 + a_{12}) \dot{e}_{ш2}$	$\dot{I}'_{ш1} = \frac{1}{H_a} (a_{21} Z_1 + a_{11}) \dot{e}_{ш2}$
1b	$= \frac{1}{H_b} (b_{11} Z_1 - b_{12}) \dot{e}_{ш2}$	$= \frac{1}{H_b} (-b_{21} Z_1 + b_{22}) \dot{e}_{ш2}$
1h	$= \frac{1}{H_h} (Z_1 + h_{11}) \dot{e}_{ш2}$	$= \frac{1}{H_h} (-h_{22} Z_1 - \Delta h) \dot{e}_{ш2}$
1f	$= \frac{1}{H_f} (-\Delta f Z_1 - f_{22}) \dot{e}_{ш2}$	$= \frac{1}{H_f} (f_{11} Z_1 + 1) \dot{e}_{ш2}$
1z	$= \frac{1}{H_z} (-z_{22} Z_1 - \Delta z) \dot{e}_{ш2}$	$= \frac{1}{H_z} (Z_1 + z_{11}) \dot{e}_{ш2}$
1y	$= \frac{1}{H_y} (y_{11} Z_1 + 1) \dot{e}_{ш2}$	$= \frac{1}{H_y} (-\Delta y Z_1 - y_{22}) \dot{e}_{ш2}$
2a	$\dot{U}'_{ш2} = \frac{1}{H_a} \Delta a Z_1 \dot{e}_{ш2}$	$\dot{I}'_{ш2} = \frac{1}{H_a} \Delta a \dot{e}_{ш2}$
2b	$= \frac{1}{H_b} Z_1 \dot{e}_{ш2}$	$= \frac{1}{H_b} \dot{e}_{ш2}$
2h	$= \frac{1}{H_h} h_{12} Z_1 \dot{e}_{ш2}$	$= \frac{1}{H_h} h_{12} \dot{e}_{ш2}$
2f	$= \frac{1}{H_f} f_{12} Z_1 \dot{e}_{ш2}$	$= \frac{1}{H_f} f_{12} \dot{e}_{ш2}$
2z	$= -\frac{1}{H_z} z_{12} Z_1 \dot{e}_{ш2}$	$= -\frac{1}{H_z} z_{12} \dot{e}_{ш2}$
2y	$= -\frac{1}{H_y} y_{12} Z_1 \dot{e}_{ш2}$	$= -\frac{1}{H_y} y_{12} \dot{e}_{ш2}$

Таблица 7.3

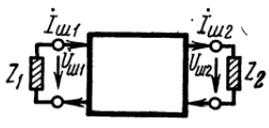
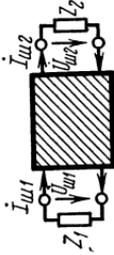
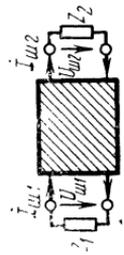
№ пп.		
1a	$\dot{U}_{ш1} = \frac{1}{H_a} [(a_{11}Z_2 + a_{12}) \dot{e}_{ш1} + \Delta a Z_1 \dot{e}_{ш2}]$	$\dot{i}_{ш1} = \frac{1}{H_a} [(a_{21}Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{ш1} - \Delta a \dot{e}_{ш2}]$
1b	$= \frac{1}{H_b} [(b_{22}Z_2 - b_{12}) \dot{e}_{ш1} + Z_1 \dot{e}_{ш2}]$	$= \frac{1}{H_b} [(-b_{21}Z_2 + b_{11}) \dot{e}_{ш1} - \dot{e}_{ш2}]$
1h	$= \frac{1}{H_h} [(-\Delta h Z_2 + h_{11}) \dot{e}_{ш1} + h_{12} Z_1 \dot{e}_{ш2}]$	$= \frac{1}{H_h} [(-h_{22}Z_2 + 1) \dot{e}_{ш1} - h_{12} \dot{e}_{ш2}]$
1f	$= \frac{1}{H_f} [(Z_2 - f_{22}) \dot{e}_{ш1} + f_{12} Z_1 \dot{e}_{ш2}]$	$= \frac{1}{H_f} [(f_{11}Z_2 - \Delta f) \dot{e}_{ш1} - f_{12} \dot{e}_{ш2}]$
1z	$= \frac{1}{H_z} [(z_{11}Z_2 - \Delta z) \dot{e}_{ш1} - z_{12} Z_1 \dot{e}_{ш2}]$	$= \frac{1}{H_z} [Z_2 - z_{22}) \dot{e}_{ш1} + z_{12} \dot{e}_{ш2}]$
1y	$= \frac{1}{H_y} [(-y_{22}Z_2 + 1) \dot{e}_{ш1} - y_{12} Z_1 \dot{e}_{ш2}]$	$= \frac{1}{H_y} [-\Delta y Z_2 + y_{11}) \dot{e}_{ш1} + y_{12} \dot{e}_{ш2}]$
2a	$\dot{U}_{ш2} = \frac{1}{H_a} [Z_2 \dot{e}_{ш1} + (a_{22}Z_1 + a_{12}) \dot{e}_{ш2}]$	$\dot{i}_{ш2} = \frac{1}{H_a} [\dot{e}_{ш1} - (a_{21}Z_1 + a_{11}) \dot{e}_{ш2}]$
2b	$= \frac{1}{H_b} [\Delta b z_{22} \dot{e}_{ш1} + (b_{11}Z_1 - b_{12}) \dot{e}_{ш2}]$	$= \frac{1}{H_b} [\Delta b \dot{e}_{ш1} + (b_{21}Z_1 - b_{22}) \dot{e}_{ш2}]$
2h	$= \frac{1}{H_h} [h_{21} Z_2 \dot{e}_{ш1} + (Z_1 + h_{11}) \dot{e}_{ш2}]$	$= \frac{1}{H_h} [h_{21} \dot{e}_{ш1} + (h_{22}Z_1 - \Delta h) \dot{e}_{ш2}]$
2f	$= \frac{1}{H_f} [f_{21} Z_2 \dot{e}_{ш1} + (\Delta f Z_1 - f_{22}) \dot{e}_{ш2}]$	$= \frac{1}{H_f} [f_{21} \dot{e}_{ш1} - (f_{11} Z_1 + 1) \dot{e}_{ш2}]$
2z	$= \frac{1}{H_z} [z_{21} Z_2 \dot{e}_{ш1} - (z_{22}Z_1 - \Delta z) \dot{e}_{ш2}]$	$= \frac{1}{H_z} [z_{21} \dot{e}_{ш1} - (Z_1 + z_{11}) \dot{e}_{ш2}]$
2y	$= \frac{1}{H_y} [y_{21} Z_2 \dot{e}_{ш1} + (y_{11} Z_1 + 1) \dot{e}_{ш2}]$	$= \frac{1}{H_y} [y_{21} \dot{e}_{ш1} + (\Delta y Z_1 - y_{22}) \dot{e}_{ш2}]$

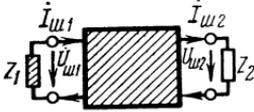
Таблица 7.4

№ пм.	
1a	$  \begin{aligned}  \dot{U}_{\text{III}} &= \frac{Z_1}{H_a} [(a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{\text{IIa}} - (a_{11} Z_2 + a_{12}) i_{\text{IIa}}] \\  i_{\text{III}} &= -\frac{1}{H_a} [(a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{\text{IIa}} - (a_{11} Z_2 + a_{12}) i_{\text{IIa}}]  \end{aligned}  $
1b	$  \begin{aligned}  &= -\frac{Z_1}{H_b} (\dot{e}_{\text{IIb}} - Z_2 i_{\text{IIb}}) \\  &= \frac{1}{H_b} (\dot{e}_{\text{IIb}} - Z_2 i_{\text{IIb}})  \end{aligned}  $
1h	$  \begin{aligned}  &= \frac{Z_1}{H_h} [(-h_{22} Z_2 + 1) \dot{e}_{\text{IIh}} + h_{12} Z_2 i_{\text{IIh}}] \\  &= -\frac{1}{H_h} [(-h_{22} Z_2 + 1) \dot{e}_{\text{IIh}} + h_{12} Z_2 i_{\text{IIh}}]  \end{aligned}  $
1f	$  \begin{aligned}  &= -\frac{Z_1}{H_f} [f_{12} \dot{e}_{\text{IIf}} + (Z_2 - f_{22}) i_{\text{IIf}}] \\  &= \frac{1}{H_f} [f_{12} \dot{e}_{\text{IIf}} + (Z_2 - f_{22}) i_{\text{IIf}}]  \end{aligned}  $
1z	$  \begin{aligned}  &= \frac{Z_1}{H_z} [(Z_2 - z_{22}) \dot{e}_{\text{IIz}} + z_{12} \dot{e}_{\text{IIz}}] \\  &= -\frac{1}{H_z} [(Z_2 - z_{22}) \dot{e}_{\text{IIz}} + z_{12} \dot{e}_{\text{IIz}}]  \end{aligned}  $
1y	$  \begin{aligned}  &= -\frac{Z_1}{H_y} [(-y_{22} Z_2 + 1) i_{\text{IIy}} + y_{12} Z_2 i_{\text{IIy}}] \\  &= \frac{1}{H_y} [(-y_{22} Z_2 + 1) i_{\text{IIy}} + y_{12} Z_2 i_{\text{IIy}}]  \end{aligned}  $



№ м.		
2a	$\dot{U}_{m2} = -\frac{Z_2}{H_a} (\dot{e}_{m2} + Z_1 i_{m2})$	$i_{m2} = -\frac{1}{H_a} (\dot{e}_{m2} + Z_1 i_{m2})$
2b	$= \frac{Z_2}{H_b} [(-b_{21} Z_1 + b_{22}) \dot{e}_{m2} + (b_{11} Z_1 - b_{12}) i_{m2}]$	$= \frac{1}{H_b} [(-b_{21} Z_1 + b_{22}) \dot{e}_{m2} + (b_{11} Z_1 - b_{12}) i_{m2}]$
2h	$= -\frac{Z_2}{H_h} [h_{21} \dot{e}_{mh} - (Z_1 + h_{11}) i_{mh}]$	$= -\frac{1}{H_h} [h_{21} \dot{e}_{mh} - (Z_1 + h_{11}) i_{mh}]$
2f	$= -\frac{Z_2}{H_f} [(-f_{11} Z_1 - 1) \dot{e}_{mf} + f_{21} Z_1 i_{mf}]$	$= -\frac{1}{H_f} [(-f_{11} Z_1 - 1) \dot{e}_{mf} + f_{21} Z_1 i_{mf}]$
2z	$= -\frac{Z_2}{H_z} [z_{21} \dot{e}_{mz1} - (Z_1 + z_{11}) \dot{e}_{mz2}]$	$= -\frac{1}{H_z} [z_{21} \dot{e}_{mz1} - (Z_1 + z_{11}) \dot{e}_{mz2}]$
2y	$= -\frac{Z_2}{H_y} [y_{21} Z_1 i_{my1} - (y_{11} Z_1 + 1) i_{my2}]$	$= -\frac{1}{H_y} [y_{21} Z_1 i_{my1} - (y_{11} Z_1 + 1) i_{my2}]$

Таблица 7.5

№ пп.	
1a	$\dot{U}_{ш1} = \frac{1}{H_a} [Z_1 (a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{шa} - (a_{11} Z_2 + a_{12}) (Z_1 i_{шa} - \dot{e}_{ш1})]$
1b	$= -\frac{1}{H_b} [Z_1 (\dot{e}_{шb} - Z_2 i_{шb}) - (b_{22} Z_2 - b_{12}) \dot{e}_{ш1}]$
1h	$= \frac{1}{H_h} \{ Z_1 [(-h_{22} Z_2 + 1) \dot{e}_{шh} + h_{12} Z_2 i_{шh}] + (-\Delta h Z_2 + h_{11}) \dot{e}_{ш1} \}$
1f	$= -\frac{1}{H_f} [f_{12} Z_1 \dot{e}_{шf} + (Z_2 - f_{22}) (Z_1 i_{шf} - \dot{e}_{ш1})]$
1z	$= \frac{1}{H_z} \{ Z_1 [(Z_2 - z_{22}) \dot{e}_{шz1} + z_{12} \dot{e}_{шz2}] + (z_{11} Z_1 - \Delta z) \dot{e}_{ш1} \}$
1y	$= -\frac{1}{H_y} [(-y_{22} Z_2 + 1) (Z_1 i_{шy1} - \dot{e}_{ш1}) + y_{12} Z_1 Z_2 i_{шy2}]$
2a	$\dot{U}_{ш2} = -\frac{Z_2}{H_a} (\dot{e}_{шa} + Z_1 i_{шa} - \dot{e}_{ш1})$
2b	$= \frac{Z_2}{H_b} [(-b_{21} Z_1 + b_{22}) \dot{e}_{шb} + (b_{11} Z_1 - b_{12}) i_{шb} + \Delta b \dot{e}_{ш1}]$
2h	$= -\frac{Z_2}{H_h} [h_{21} (\dot{e}_{шh} - \dot{e}_{ш1}) - (Z_1 + h_{11}) i_{шh}]$
2f	$= -\frac{Z_2}{H_f} [(-f_{11} Z_1 - 1) \dot{e}_{шf} + f_{21} (Z_1 i_{шf} - \dot{e}_{ш1})]$
2z	$= -\frac{Z_2}{H_z} [z_{21} (\dot{e}_{шz1} - \dot{e}_{ш1}) - (Z_1 + z_{11}) \dot{e}_{шz2}]$
2y	$= -\frac{Z_2}{H_y} [y_{21} (Z_1 i_{шy1} - \dot{e}_{ш1}) - (y_{11} Z_1 + 1) i_{шy2}]$

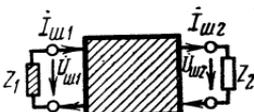
№ п/п.	
3a	$i_{ш1} = -\frac{1}{H_a} [(a_{21} Z_2 + a_{22}) (e_{шa} - e_{ш1}) - (a_{11} Z_2 + a_{12}) i_{шa}] =$
3b	$= \frac{1}{H_b} [e_{шb} - Z_2 i_{шb} + (-b_{21} Z_2 + b_{11}) e_{ш1}] =$
3h	$= -\frac{1}{H_h} [(-h_{22} Z_2 + 1) (e_{шh} - e_{ш1}) + h_{12} Z_2 i_{шh}] =$
3f	$= \frac{1}{H_f} [f_{12} e_{шf} + (Z_2 - f_{22}) i_{шf} + (f_{11} Z_2 - \Delta f) e_{ш1}] =$
3z	$= -\frac{1}{H_z} [(Z_2 - z_{22}) (e_{шz1} - e_{ш1}) + z_{12} e_{шz}] =$
3y	$= \frac{1}{H_y} [(-y_{22} Z_2 + 1) i_{шы1} + y_{12} Z_2 i_{шы2} + (-\Delta y Z_2 + y_{11}) e_{ш1}]$
4a	$i_{ш2} = -\frac{1}{H_a} (e_{шa} + Z_1 i_{шa} - e_{ш1}) =$
4b	$= \frac{1}{H_b} [(-b_{21} Z_1 + b_{22}) e_{шb} + (b_{11} Z_1 - b_{12}) i_{шb} + \Delta b e_{ш1}] =$
4h	$= -\frac{1}{H_h} [h_{21} (e_{шh} - e_{ш1}) - (Z_1 + h_{11}) i_{шh}] =$
4f	$= -\frac{1}{H_f} [(-f_{11} Z_1 - 1) e_{шf} + f_{21} (Z_1 i_{шf} - e_{ш1})] =$
4z	$= -\frac{1}{H_z} [z_{21} (e_{шz1} - e_{ш1}) - (Z_1 + z_{11}) e_{шz2}] =$
4y	$= -\frac{1}{H_y} [y_{21} (Z_1 i_{шы1} - e_{ш1}) - (y_{11} Z_1 + 1) i_{шы2}]$

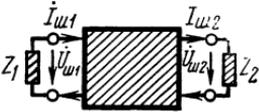
Таблица 7.6

№ пп.	
1a	$\dot{U}_{ш1} = \frac{Z_1}{H_a} [(a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{шa} - (a_{11} Z_2 + a_{12}) i_{шa} + \Delta a \dot{e}_{ш2}]$
1b	$= - \frac{Z_1}{H_b} (\dot{e}_{шb} - Z_2 i_{шb} - \dot{e}_{ш2})$
1h	$= \frac{Z_1}{H_h} [(-h_{2a} Z_2 + 1) \dot{e}_{шh} + h_{12} (Z_2 i_{шh} + \dot{e}_{ш2})]$
1f	$= - \frac{Z_1}{H_f} [f_{12} (\dot{e}_{шf} - \dot{e}_{ш2}) + (Z_2 - f_{22}) i_{шf}]$
1z	$= \frac{Z_1}{H_z} [(Z_2 - Z_{22}) \dot{e}_{шz1} + z_{12} (\dot{e}_{шz2} - \dot{e}_{ш2})]$
1y	$= - \frac{Z_1}{H_y} [(-y_{22} Z_2 + 1) i_{шы1} + y_{12} (Z_2 i_{шы2} + \dot{e}_{ш2})]$
2a	$\dot{U}_{ш2} = - \frac{1}{H_a} [Z_2 (\dot{e}_{шa} + Z_1 i_{шa}) - (a_{22} Z_1 + a_{12}) \dot{e}_{ш2}]$
2b	$= \frac{1}{H_b} [Z_2 (-b_{21} Z_1 + b_{22}) \dot{e}_{шb} + (b_{11} Z_1 - b_{12}) (Z_2 i_{шb} + \dot{e}_{ш2})]$
2h	$= - \frac{1}{H_h} [h_{21} Z_2 \dot{e}_{шh} - (Z_1 + h_{11}) (Z_2 i_{шh} + \dot{e}_{ш2})]$
2f	$= - \frac{1}{H_f} [Z_2 [(-f_{11} Z_1 - 1) \dot{e}_{шf} + f_{11} Z_1 i_{шf}] + (\Delta f Z_1 + f_{22}) \dot{e}_{ш2}]$
2z	$= - \frac{1}{H_z} [Z_2 [z_{21} \dot{e}_{шz1} - (Z_1 + z_{11}) \dot{e}_{шz2}] + (z_{22} Z_1 + \Delta z) \dot{e}_{ш2}]$
2y	$= - \frac{1}{H_y} [y_{21} Z_1 Z_2 i_{шы1} - (y_{11} Z_1 + 1) (Z_2 i_{шы2} + \dot{e}_{ш2})]$

№ пп.	
3a	$i_{\text{м}1} = -\frac{1}{H_a} [(a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{\text{м}a} - (a_{11} Z_2 + a_{12}) i_{\text{м}a} + \Delta a \dot{e}_{\text{м}2}]$
3b	$= \frac{1}{H_b} (\dot{e}_{\text{м}b} - Z_2 i_{\text{м}b} - \dot{e}_{\text{м}2})$
3h	$= -\frac{1}{H_h} [(-h_{22} Z_2 + 1) \dot{e}_{\text{м}h} + h_{12} (Z_2 i_{\text{м}h} + \dot{e}_{\text{м}2})]$
3f	$= \frac{1}{H_f} [f_{12} (\dot{e}_{\text{м}f} - \dot{e}_{\text{м}2}) + (Z_2 - f_{22}) i_{\text{м}f}]$
3z	$= -\frac{1}{H_z} [(Z_2 - z_{22}) \dot{e}_{\text{м}z1} + z_{12} (\dot{e}_{\text{м}z2} - \dot{e}_{\text{м}2})]$
3y	$= \frac{1}{H_y} [(-y_{22} Z_2 + 1) i_{\text{м}y1} + y_{12} (Z_2 i_{\text{м}y2} + \dot{e}_{\text{м}2})]$
4a	$i_{\text{м}2} = -\frac{1}{H_a} [\dot{e}_{\text{м}a} + Z_1 i_{\text{м}a} + (a_{21} Z_1 + a_{11}) \dot{e}_{\text{м}2}]$
4b	$= \frac{1}{H_b} [-b_{21} Z_1 + b_{22}) (\dot{e}_{\text{м}b} - \dot{e}_{\text{м}2}) + (b_{11} Z_1 - b_{12}) i_{\text{м}b}]$
4h	$= -\frac{1}{H_h} [h_{21} \dot{e}_{\text{м}h} - (Z_1 + h_{11}) i_{\text{м}h} + (-h_{22} Z_1 - \Delta h) \dot{e}_{\text{м}2}]$
4f	$= -\frac{1}{H_f} [(-f_{11} Z_1 - 1) (\dot{e}_{\text{м}f} - \dot{e}_{\text{м}2}) + f_{21} Z_1 i_{\text{м}f}]$
4z	$= -\frac{1}{H_z} [z_{21} \dot{e}_{\text{м}z1} - (Z_1 + z_{11}) (\dot{e}_{\text{м}z2} - \dot{e}_{\text{м}2})]$
4y	$= -\frac{1}{H_y} [y_{21} Z_1 i_{\text{м}y1} - (y_{11} Z_1 + 1) i_{\text{м}y2} + (-\Delta y Z_1 - y_{22}) \dot{e}_{\text{м}2}]$

Таблица 7.7

№ пп.	
1a	$\dot{U}_{ш1} = \frac{1}{H_a} \{Z_1[(a_{21}Z_2 + a_{22})\dot{e}_{шa} + \Delta a \dot{e}_{ш2}] - (a_{11}Z_2 + a_{12})(Z_1 i_{шa} - \dot{e}_{ш1})\}$
1b	$= -\frac{1}{H_b} [Z_1 (\dot{e}_{шb} - Z_2 i_{шb} - \dot{e}_{ш2}) - (b_{22} Z_2 - b_{12}) \dot{e}_{ш1}]$
1h	$= \frac{1}{H_h} \{Z_1(-h_{22}Z_2 + 1)\dot{e}_{шh} + h_{12}(Z_2 i_{шh} + \dot{e}_{ш2})\} + (-\Delta h Z_2 + h_{11})\dot{e}_{ш1}$
1f	$= -\frac{1}{H_f} [f_{12} Z_1 (\dot{e}_{шf} - \dot{e}_{ш2}) + (Z_2 - f_{22})(Z_1 i_{шf} - \dot{e}_{ш1})]$
1z	$= \frac{1}{H_z} \{Z_1 [(Z_2 - z_{22}) \dot{e}_{шz1} + z_{12} (\dot{e}_{шz2} - \dot{e}_{ш2})] + (z_{11} Z_2 - \Delta z) \dot{e}_{ш1}\}$
1y	$= -\frac{1}{H_y} [(-y_{22} Z_2 + 1)(Z_1 i_{шy1} - \dot{e}_{ш1}) + y_{12} Z_1 (Z_2 i_{шy2} + \dot{e}_{ш2})]$
2a	$\dot{U}_{ш2} = -\frac{1}{H_a} [Z_2 (\dot{e}_{шa} + Z_1 i_{шa} - \dot{e}_{ш1}) - (a_{22} Z_1 + a_{12}) \dot{e}_{ш2}]$
2b	$= \frac{1}{H_b} \{Z_2 [(-b_{21} Z_1 + b_{22}) \dot{e}_{шb} + \Delta b \dot{e}_{ш1}] + (b_{11} Z_1 - b_{12})(Z_2 i_{шb} + \dot{e}_{ш2})\}$
2h	$= -\frac{1}{H_h} [h_{21} Z_2 (\dot{e}_{шh} - \dot{e}_{ш1}) - (Z_1 + h_{11})(Z_2 i_{шh} + \dot{e}_{ш2})]$
2f	$= -\frac{1}{H_f} \{Z_2 [(-f_{11} Z_1 - 1) \dot{e}_{шf} + f_{21}(Z_1 i_{шf} - \dot{e}_{ш1})] + (\Delta f Z_1 + f_{22}) \dot{e}_{ш2}\}$
2z	$= -\frac{1}{H_z} \{Z_2 [-z_{21} (\dot{e}_{шz1} - \dot{e}_{ш1}) - (Z_1 + z_{11}) \dot{e}_{шz2}] + (z_{22} Z_1 + \Delta z) \dot{e}_{ш2}\}$
2y	$= -\frac{1}{H_y} [y_{21} Z_2 (Z_1 i_{шy1} - \dot{e}_{ш1}) - (y_{11} Z_1 + 1)(Z_2 i_{шy2} + \dot{e}_{ш2})]$

№ пп.	
3a	$i_{\text{ш1}} = -\frac{1}{H_a} [(a_{21}Z_2 + a_{22})(\dot{e}_{\text{шa}} + \dot{e}_{\text{ш1}}) - (a_{11}Z_2 + a_{12})i_{\text{шa}} + \Delta a \dot{e}_{\text{ш2}}]$
3b	$= \frac{1}{H_b} [\dot{e}_{\text{шb}} - Z_2 i_{\text{шb}} + (-b_{21}Z_2 + b_{11})\dot{e}_{\text{ш1}} - \dot{e}_{\text{ш2}}]$
3h	$= -\frac{1}{H_h} [(-h_{22}Z_2 + 1)(\dot{e}_{\text{шh}} - \dot{e}_{\text{ш1}}) + h_{12}(Z_2 i_{\text{шh}} + \dot{e}_{\text{ш2}})]$
3f	$= \frac{1}{H_f} [f_{13}(\dot{e}_{\text{шf}} - \dot{e}_{\text{ш2}}) + (Z_2 - f_{22})i_{\text{шf}} + (f_{11}Z_2 + \Delta f)\dot{e}_{\text{ш1}}]$
3z	$= -\frac{1}{H_z} [(Z_2 - z_{22})(\dot{e}_{\text{шz1}} - \dot{e}_{\text{ш1}}) + z_{12}(\dot{e}_{\text{шz2}} - \dot{e}_{\text{ш2}})]$
3y	$= \frac{1}{H_y} [(-y_{22}Z_2 + 1)i_{\text{шy1}} + y_{12}(Z_2 i_{\text{шy2}} + \dot{e}_{\text{ш2}}) + (-\Delta y Z_2 + y_{11})\dot{e}_{\text{ш1}}]$
4a	$i_{\text{ш2}} = -\frac{1}{H_a} [\dot{e}_{\text{шa}} + Z_1 i_{\text{шa}} - \dot{e}_{\text{ш1}} + (a_{21}Z_1 + a_{11})\dot{e}_{\text{ш2}}]$
4b <sub>a</sub>	$= \frac{1}{H_b} [(-b_{21}Z_1 + b_{22})(\dot{e}_{\text{шb}} - \dot{e}_{\text{ш2}}) + (b_{11}Z_1 - b_{12})i_{\text{шb}} + \Delta b \dot{e}_{\text{ш1}}]$
4h	$= -\frac{1}{H_h} [h_{21}(\dot{e}_{\text{шb}} - \dot{e}_{\text{ш1}}) - (Z_1 + h_{11})i_{\text{шh}} + (-h_{22}Z_1 - \Delta h)\dot{e}_{\text{ш2}}]$
4f	$= -\frac{1}{H_f} [(-f_{11}Z_1 - 1)(\dot{e}_{\text{шf}} - \dot{e}_{\text{ш2}}) + f_{21}(Z_1 i_{\text{шf}} - \dot{e}_{\text{ш1}})]$
4z	$= -\frac{1}{H_z} [Z_{21}(\dot{e}_{\text{шz1}} - \dot{e}_{\text{ш1}}) - (Z_1 + z_{11})(\dot{e}_{\text{шz2}} - \dot{e}_{\text{ш2}})]$
4y	$= -\frac{1}{H_y} [y_{21}(Z_1 i_{\text{шy1}} - \dot{e}_{\text{ш1}}) - (y_{11}Z_1 + 1)i_{\text{шy2}} + (-\Delta y Z_1 - y_{22})\dot{e}_{\text{ш2}}]$

тех же нагрузках соответственно от источников  $\dot{e}_{ш1}$  и  $\dot{e}_{ш2}$ .

Выразим мощности шума через шумовые напряжения:

$$P_{шс2} = \frac{|U''_{ш2}|^2}{|Z_2|}, \quad P_{шс1} = \frac{|U''_{ш1}|^2}{|Z_1|},$$

$$P_{шс12} = \frac{|U_{ш12}|^2}{|Z_2|}, \quad P_{шс21} = \frac{|U_{шс21}|^2}{Z_1}. \quad (7.35)$$

Подставив (7.35) в (7.33) и (7.34), получим:

$$F_1 = \frac{|U''_{ш2}|^2}{|U_{ш12}|^2}, \quad F_2 = \frac{|U''_{ш1}|^2}{|U_{ш21}|^2}. \quad (7.36)$$

Подставив (7.10) и (7.11) соответственно в (7.36) и (7.37), а затем раскрыв величины  $U''_{ш2}$  и  $U''_{ш1}$ , найдем:

$$F_1 = \frac{|e_{ша} + Z_1 i_{ша}|^2 + |e_{ш2}|^2 |a_{21} Z_1 + a_{22}|^2 + |e_{ш1}|^2}{|e_{ш1}|^2}, \quad (7.37)$$

$$F_2 = \frac{|e_{шб} + Z_2 i_{шб}|^2 + |e_{ш1}|^2 |-b_{21} Z_2 + b_{22}|^2 + |e_{ш2}|^2}{|e_{ш2}|^2}. \quad (7.38)$$

При необходимости можно также выразить коэффициенты шума через шумовые токи проводимостей  $Y_1 = 1/Z_1$  и  $Y_2 = 1/Z_2$ , воспользовавшись для этого формулами преобразования табл. 10.1.

Перейдем далее к шумовым сопротивлениям и проводимостям, используя для этого (2.1), (2.2) и полагая  $|e_{ш2}|^2 = 4kT\Delta f R_{ш2}$ ,  $|i_{ш2}|^2 = 4kT\Delta f G_{ш2}$ . После соответствующих подстановок в (7.37) получим

$$F_1 = \frac{R_{шн} + G_{ша} |Z_1 + Z_{кор}|^2 + R_{ш2} |a_{21} Z_1 + a_{11}|^2 + R_{ш1}}{R_{ш1}} \quad (7.39)$$

или

$$F_1 = \frac{G_{шн} + R_{ша} |Y_1 + Y_{кор}|^2 + G_{ш2} |Z_2|^2 |a_{21} + Y a_{11}|^2 + G_{ш1}}{G_{ш1}}. \quad (7.40)$$

Таким же образом можно выразить коэффициент шума для передачи справа налево через первичные шумовые параметры.

#### 7.4. МИНИМИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА

Коэффициент шума системы является функцией вещественной составляющей сопротивления источника сигнала, поэтому оптимальную величину его на примере пере-

дачи слева направо определим, продифференцировав (7.39) и решив уравнение  $dF_1/dR_{ш1}=0$ . В результате получим

$$R_{1 \text{ опт}} = \left\{ \frac{R_{шн} + G_{ш а} [R_{кор}^2 + (X_1 + X_{кор})^2] + R_{ш2} |i X_1 a_{21} + a_{11}|^2}{G_{ш а} + R_{ш2} |a_{21}|^2} \right\}^{1/2} =$$

$$= \left( \frac{R_{шн} + G_{ш а} |i X_1 + Z_{кор}|^2 + R_{ш2} |i X_1 a_{21} + a_{11}|^2}{G_{ш а} + R_{ш2} |a_{21}|^2} \right)^{1/2} \quad (7.41)$$

и, выполнив условие шумового сопряжения  $X_1 = -X_{кор}$ , найдем

$$R_{1 \text{ мин}} = \left( \frac{R_{шн} + G_{ш а} R_{кор}^2 + R_{ш2} |i X_1 a_{21} + a_{11}|^2}{G_{ш а} + R_{ш2} |a_{21}|^2} \right)^{1/2}. \quad (7.42)$$

Подставив (7.41), (7.42) в (7.39), определим

$$F_{и 1 \text{ опт}} = \frac{R_{шн} + G_{ш а} [(R_{1 \text{ опт}} + R_{кор})^2 + (X_1 + X_{кор})^2] +}{R_{1 \text{ опт}}}$$

$$\frac{+ R_{ш2} |a_{21} (R_{1 \text{ опт}} + i X_1) + a_{11}|^2}{R_{1 \text{ опт}}} \quad (7.43)$$

и

$$F_{и 1 \text{ мин}} = \frac{R_{шн} + G_{ш а} (R_{1 \text{ мин}} + R_{кор})^2 + R_{ш2} |a_{21} (R_{1 \text{ мин}} + i X_1) + a_{11}|^2}{R_{1 \text{ мин}}}. \quad (7.44)$$

Используя пересчетные соотношения табл. 4.1, можно найти  $F_{и 1 \text{ опт}}$  и  $F_{и 1 \text{ мин}}$  в любой из систем параметров. Таким же путем определяются экстремальные величины коэффициентов шума для передачи сигнала справа налево. Формулы (7.41)—(7.44) учитывают шумы нагрузки, влияние которых при одной и той же величине  $R_{ш2}$  неодинаково в активных и пассивных системах. Оно незначительно при наличии высокого усиления и возрастает с уменьшением его, но может быть и весьма ощутимым в пассивных цепях с большим затуханием.

## 7.5. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ШУМА

Характеристические шумовые параметры четырехполюсника позволяют определить собственные показатели шума системы при отсутствии отражений в точках подключения к четырехполюснику источника сигнала и нагрузки.

Рассмотрим общий случай, когда флуктуации порождаются всеми составляющими: источником сигнала, че-

тырехполосником и нагрузкой (рис. 7.1). Под воздействием этих флуктуаций возникают шумовые токи и напряжения между внешними выводами четырехполосника:

$$\dot{U}_{ш\ c\ 1} = \dot{U}_{ш\ 11} + \dot{U}_{ш\ c\ 1\ ч} + \dot{U}_{ш\ 12}, \quad (7.45)$$

$$\dot{I}_{ш\ c\ 1} = \dot{I}_{ш11} + \dot{I}_{ш\ c\ 1\ ч} + \dot{I}_{ш\ 12}, \quad (7.46)$$

$$\dot{U}_{ш\ c\ 2} = \dot{U}_{ш\ 22} + \dot{U}_{ш\ c\ 2\ ч} + \dot{U}_{ш\ 21}, \quad (7.47)$$

$$\dot{I}_{ш\ c\ 2} = \dot{I}_{ш\ 22} + \dot{I}_{ш\ c\ 2\ ч} + \dot{I}_{ш\ 21}. \quad (7.48)$$

Характеристические шумовые токи и напряжения четырехполосника  $\dot{U}_{ш\ c\ 1\ ч}$ ,  $\dot{I}_{ш\ c\ 1\ ч}$  и  $\dot{U}_{ш\ c\ 2\ ч}$ ,  $\dot{I}_{ш\ c\ 2\ ч}$  приведены в табл. 4.12, поэтому определим только недостающие составляющие:

— от источника  $\dot{e}_{ш1}$ :

$$\dot{U}_{ш11} = \frac{1}{2} \dot{e}_{ш1}, \quad \dot{I}_{ш\ 11} = \frac{\dot{e}_{ш1}}{2 Z_{c1}}, \quad (7.49)$$

$$\dot{U}_{ш\ 21} = \frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{e}_{ш1}, \quad \dot{I}_{ш21} = \frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_{c1}} \dot{e}_{ш1}; \quad (7.50)$$

— от источника  $\dot{e}_{ш2}$ :

$$\dot{U}_{ш\ 12} = \frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{ш2}, \quad \dot{I}_{ш12} = -\frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} \times \\ \times e^{-g_{c12}} \dot{e}_{ш2}, \quad (7.51)$$

$$\dot{U}_{ш\ 22} = \frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{e}_{ш2}, \quad \dot{I}_{ш\ 22} = \frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} \times \\ \times e^{-g_{c1}} \dot{e}_{ш2}. \quad (7.52)$$

Располагая составляющими шумовых токов во внешних цепях системы, найдем их результирующие величины:

— от источников  $\dot{e}_{ш1}$  и  $\dot{e}_{ш2}$ :

$$\dot{U}_{ш\ c\ 1} = \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{ш1} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{ш2} \right], \quad (7.53)$$

$$\dot{I}_{ш\ c\ 1} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{ш1} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{ш2} \right], \quad (7.54)$$

$$\dot{U}_{ш c 2} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2} \right], \quad (7.55)$$

$$\dot{I}_{ш c 2} = \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_{c1}} \dot{e}_{ш1} - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{ш2} \right]. \quad (7.56)$$

*Частный случай 1.* Обратимый шумящий несимметричный четырехполюсник  $Z_{c1} \neq Z_{c2}$ ,  $g_{c1} = g_{c2} = g_c$ .

Подставив исходные условия в (7.49)—(7.56), получим шумовые характеристические токи и напряжения:

— от источника  $\dot{e}_{ш1}$ :

$$\dot{U}_{ш11} = \frac{1}{2} \dot{e}_{ш1}, \quad \dot{I}_{ш11} = \frac{1}{2Z_{c1}} \dot{e}_{ш1}, \quad (7.57)$$

$$\dot{U}_{ш21} = \frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш1}, \quad \dot{I}_{ш21} = \frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2})^{1/2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш1}; \quad (7.58)$$

— от источника  $\dot{e}_{ш2}$ :

$$\dot{U}_{ш12} = \frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш2}; \quad \dot{I}_{ш12} = -\frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш2}, \quad (7.59)$$

$$\dot{U}_{ш22} = \frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш2}, \quad \dot{I}_{ш22} = -\frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш2}; \quad (7.60)$$

— от источников  $\dot{e}_{ш1}$  и  $\dot{e}_{ш2}$ :

$$\dot{U}_{ш c 1} = \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{ш1} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш2} \right],$$

$$\dot{I}_{ш c 1} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{ш1} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш2} \right], \quad (7.61)$$

$$\dot{U}_{ш c 2} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2} \right],$$

$$\dot{I}_{ш c 2} = \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш1} - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{ш2} \right]. \quad (7.62)$$

*Частный случай 2.* Обратимый шумящий симметричный четырехполюсник  $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c$ ,  $g_{c1} = g_{c2} = g_c$ .

Подставив исходные условия в (7.49)—(7.56), получим шумовые характеристические величины токов и напряжений:

— от источника  $\dot{e}_{ш1}$ :

$$\dot{U}_{ш11} = \frac{1}{2} \dot{e}_{ш1}, \quad \dot{I}_{ш11} = \frac{1}{2Z_c} \dot{e}_{ш1}, \quad (7.63)$$

$$\dot{U}_{ш21} = \frac{1}{2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш1}, \quad \dot{I}_{ш21} = \frac{1}{2Z_c} e^{-g_c} \dot{e}_{ш1}; \quad (7.64)$$

— от источника  $\dot{e}_{ш2}$ :

$$\dot{U}_{ш12} = \frac{1}{2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш2}, \quad \dot{I}_{ш12} = -\frac{1}{2Z_c} e^{-g_c} \dot{e}_{ш2}, \quad (7.65)$$

$$\dot{U}_{ш22} = \frac{1}{2} e^{-g_c} \dot{e}_{ш2}, \quad \dot{I}_{ш22} = -\frac{1}{2Z_c} e^{-g_c} \dot{e}_{ш2}; \quad (7.66)$$

— от источников  $\dot{e}_{ш1}$  и  $\dot{e}_{ш2}$ :

$$\dot{U}_{шc1} = \frac{1}{2} (\dot{e}_{ш1} + e^{-g_c} \dot{e}_{ш2}), \quad \dot{I}_{шc1} = \frac{1}{2Z_c} (\dot{e}_{ш1} - e^{-g_c} \dot{e}_{ш2}), \quad (7.67)$$

$$\dot{U}_{шc2} = \frac{1}{2} (e^{-g_c} \dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2}), \quad \dot{I}_{шc2} = \frac{1}{2Z_c} (e^{-g_c} \dot{e}_{ш1} + \dot{e}_{ш2}). \quad (7.68)$$

Используя обобщенные ф-лы (7.36) совместно с (7.63)—(7.68), после подстановок и необходимых выкладок найдем выражения избыточных коэффициентов шума системы при подключении к четырехполюснику источника сигнала и нагрузки с сопротивлениями, равными характеристическим:

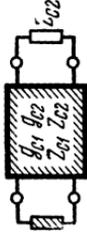
$$F_{cн1} = \frac{R_{шc2ч} + R_{ш2}}{R_{ш1}} \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{2a_{c1}}, \quad (7.69)$$

$$F_{cн2} = \frac{R_{шc1ч} + R_{ш1}}{R_{ш2}} \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{2a_{c2}}. \quad (7.70)$$

Характеристические коэффициенты шума при соблюдении условий  $R_{ш1} = R_{c1}$  и  $R_{ш2} = R_{c2}$  являются величинами для шумящей системы строго постоянными.

Используя соотношения табл. 4.12 и (7.49)—(7.52), получим зависимости между характеристическими шумовыми величинами и шумовыми источниками, которые с учетом возможных частных случаев и встречающихся на практике систем, приведены в табл. 7.8—7.10.

Таблица 7.8

№ шт.			$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$
	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$	
1a	$\dot{U}_{мс1} = \frac{1}{2} (\dot{e}_{м1} + \dot{e}_{ма} - Z_{c1} i_{ма})$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{м1} + \dot{e}_{ма} - Z_{c1} i_{ма})$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{м1} + \dot{e}_{ма} - Z_c i_{ма})$
1b	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{м1} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_{c2}} (\dot{e}_{мб} - Z_{c2} i_{мб}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{м1} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_{c2}} (\dot{e}_{мб} - Z_{c2} i_{мб}) \right]$	$= -\frac{1}{2} [ -\dot{e}_{м1} + e^{-g_c} (\dot{e}_{мб} - Z_c i_{мб}) ]$
1г	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{м1} + \dot{e}_{мг} + (Z_{c1} Z_{c2})^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} i_{мг} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{м1} + \dot{e}_{мг} + (Z_{c1} Z_{c2})^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} i_{мг} \right]$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{м1} + \dot{e}_{мг} + Z_c e^{-g_c} i_{мг})$
1ф	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{м1} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_{c2}} \dot{e}_{мф} + Z_{c1} i_{мф} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{м1} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^2 e^{-g_c} \dot{e}_{мф} + Z_{c1} i_{мф} \right]$	$= -\frac{1}{2} (-\dot{e}_{м1} + e^{-g_c} \dot{e}_{мф} + Z_c i_{мф})$

№ мн.	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$
1z	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m21} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{m22} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m21} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_c} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{m22} \right]$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m21} - e^{-g_c} \dot{e}_{m22})$
1y	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{m1} + Z_{c1} i_{mY1} - \right. \\ \left. - (Z_{c1} Z_{c2})^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} i_{mY2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{m1} + Z_{c1} i_{mY1} - \right. \\ \left. - (Z_{c1} Z_c)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} i_{mY2} \right]$	$= -\frac{1}{2} [-\dot{e}_{m1} + Z_c (i_{mY1} - e^{-g_c} i_{mY2})]$
2a	$I_{m c1} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m a}) - i_{m a} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m a}) - i_{m a} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m a}) - i_{m a} \right]$
2b	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \times \right. \\ \left. \times (\dot{e}_{mb} - Z_{c2} i_{mb}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + (Z_{c1} Z_c)^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \times \right. \\ \left. \times (\dot{e}_{mb} - Z_{c2} i_{mb}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} \dot{e}_{m1} + \frac{1}{Z_c} e^{-g_c} (\dot{e}_{mb} - Z_c i_{mb}) \right]$



Продолжение табл. 7.8

№ мл.	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c3}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
2h	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) + \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right) \frac{1}{2} e^{-g_{c2}} i_{mh} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) + \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right) \frac{1}{2} e^{-g_c} i_{mh} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) + e^{-g_c} i_{mh} \right]$
2f	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + \left( Z_{c1} Z_{c3} \right) e^{-\frac{1}{2} g_{c3}} \dot{e}_{mf} + i_{mf} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + \left( Z_{c1} Z_{c3} \right) e^{-\frac{1}{2} g_c} \dot{e}_{mf} + i_{mf} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} (\dot{e}_{m1} + e^{-g_c} \dot{e}_{mf}) + i_{mf} \right]$
2z	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) - \left( Z_{c1} Z_{c3} \right) e^{-\frac{1}{2} g_{c3}} \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) - \left( Z_{c1} Z_{c3} \right) e^{-\frac{1}{2} g_c} \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1} - e^{-g_c} \dot{e}_{mz2})$
2y	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + i_{my1} - \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right) \frac{1}{2} e^{-g_{c2}} i_{my2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + i_{my1} - \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right) \frac{1}{2} e^{-g_c} i_{my2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z_c} \dot{e}_{m1} + i_{my1} - e^{-g_c} i_{my2} \right)$

№ ш.			$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$			
3a	$\dot{U}_{\text{ш}c2} = -\frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_{c1}} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}a} + Z_{c1} i_{\text{ш}a})$	$= -\frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}a} + Z_{c1} i_{\text{ш}a})$	$= -\frac{1}{2} e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}a} + Z_c i_{\text{ш}a})$	$= -\frac{1}{2} e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}b} + Z_c i_{\text{ш}b})$	
3б	$= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_{c1}} \dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}b} + Z_{c2} i_{\text{ш}b} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}b} + Z_{c2} i_{\text{ш}b} \right]$	$= \frac{1}{2} (e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}b} + Z_c i_{\text{ш}b})$	$= \frac{1}{2} (e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}b} + Z_c i_{\text{ш}b})$	
3в	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_{c1}} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}h}) - Z_{c2} i_{\text{ш}h} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}h}) - Z_{c2} i_{\text{ш}h} \right]$	$= -\frac{1}{2} [e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}h}) - Z_c i_{\text{ш}h}]$	$= -\frac{1}{2} [e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}h}) - Z_c i_{\text{ш}h}]$	
3г	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{ш}f} - \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_{c1}} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}f}) + Z_{c1} i_{\text{ш}f} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{ш}f} - \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^2 e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}f}) + Z_{c1} i_{\text{ш}f} \right]$	$= \frac{1}{2} [\dot{e}_{\text{ш}f} - e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}f}) + Z_c i_{\text{ш}f}]$	$= \frac{1}{2} [\dot{e}_{\text{ш}f} - e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш}1} + \dot{e}_{\text{ш}f}) + Z_c i_{\text{ш}f}]$	

Продолжение табл. 7.8

№ пп.			$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$			
3z	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} e^{-g_{c1}} (-\dot{e}_{m11} + \dot{e}_{m21}) - \dot{e}_{m22} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m11} + \dot{e}_{m21}) - \dot{e}_{m22} \right]$	$= -\frac{1}{2} [e^{-g_c} (-\dot{e}_{m11} + \dot{e}_{m21}) - \dot{e}_{m22}]$		
3y	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} e^{-g_{c1}} (\dot{e}_{m11} - Z_{c1} i_{m1y1}) + Z_{c2} i_{m1y2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} e^{-g_c} (\dot{e}_{m11} - Z_{c1} i_{m1y1}) + Z_{c2} i_{m1y2} \right]$	$= \frac{1}{2} [e^{-g_c} (\dot{e}_{m11} - Z_c i_{m1y1}) + Z_c i_{m1y2}]$		
4a	$i_{m22} = -\frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2}) e^{-g_{c1}} \times$ $\times (-\dot{e}_{m11} + \dot{e}_{m22} + Z_{c1} i_{m2a})$	$= -\frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2}) e^{-g_c} \times$ $\times (-\dot{e}_{m11} + \dot{e}_{m22} + Z_{c1} i_{m2a})$	$= -\frac{1}{2} [Z_c e^{-g_c} (-\dot{e}_{m11} + \dot{e}_{m22}) + i_{m2a}]$		
4b	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2}) e^{-g_{c1}} \dot{e}_{m11} + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{m2b} + i_{m2b} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2}) e^{-g_c} \dot{e}_{m11} + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{m2b} + i_{m2b} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} (e^{-g_c} \dot{e}_{m11} + \dot{e}_{m2b}) + i_{m2b} \right]$		

№ п/п.			$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} \neq g_{c2}$		$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$	
	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} = Z_{c2}, \quad g_{c1} = g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} = Z_{c2}, \quad g_{c1} = g_{c2}$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$
4h	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) - i_{mh} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) - i_{mh} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) - i_{mh} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) - i_{mh} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) - i_{mh} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) - i_{mh} \right]$
4f	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c1}} (\dot{e}_{m1} - Z_{c1} i_{mf}) + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mf} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_{c1} i_{mf}) + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mf} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_{c1} i_{mf}) + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mf} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_{c1} i_{mf}) + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mf} \right]$	$= \frac{1}{2Z_c} [e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_c i_{mf}) + \dot{e}_{mf}]$	$= \frac{1}{2Z_c} [e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_c i_{mf}) + \dot{e}_{mf}]$
4z	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} [e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) - \dot{e}_{mz2}]$	$= -\frac{1}{2Z_c} [e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) - \dot{e}_{mz2}]$
4y	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c1}} (\dot{e}_{m1} - Z_{c1} i_{my1}) + i_{my2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_{c1} i_{my1}) + i_{my2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_{c1} i_{my1}) + i_{my2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_{c1} i_{my1}) + i_{my2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ e^{-g_c} \left( \frac{1}{Z_c} \dot{e}_{m1} - i_{my1} \right) + i_{my2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ e^{-g_c} \left( \frac{1}{Z_c} \dot{e}_{m1} - i_{my1} \right) + i_{my2} \right]$

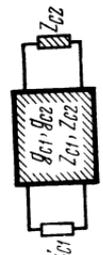
Таблица 7.9

№ пп.			$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$			
1а	$\dot{U}_{\text{шс1}} = \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{шa}} - Z_{c1} i_{\text{шa}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{\text{ш2}} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{шa}} - Z_{c1} i_{\text{шa}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш2}} \right]$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{\text{шa}} - Z_c i_{\text{шa}} + e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш2}})$		
1б	$= -\frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} (\dot{e}_{\text{шb}} - Z_{c2} i_{\text{шb}} + \dot{e}_{\text{ш2}})$	$= -\frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{шb}} - Z_{c2} i_{\text{шb}} + \dot{e}_{\text{ш2}})$	$= -\frac{1}{2} e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{шb}} - Z_c i_{\text{шb}} + \dot{e}_{\text{ш2}})$		
1в	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{шh}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} (Z_{c2} i_{\text{шh}} + e_{\text{ш2}}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{шh}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} (Z_{c2} i_{\text{шh}} + \dot{e}_{\text{ш2}}) \right]$	$= \frac{1}{2} [\dot{e}_{\text{шh}} + e^{-g_c} (Z_c i_{\text{шh}} + \dot{e}_{\text{ш2}})]$		
1г	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} (\dot{e}_{\text{шf}} - \dot{e}_{\text{ш2}}) + Z_{c1} i_{\text{шf}} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{шf}} - \dot{e}_{\text{ш2}}) + Z_{c1} i_{\text{шf}} \right]$	$= -\frac{1}{2} [e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{шf}} - \dot{e}_{\text{ш2}}) + Z_c i_{\text{шf}}]$		



№ пп.	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$		$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$		$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	
	1z	$\frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{нз1}} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{\text{нз2}} - \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$	$\frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{нз1}} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{нз2}} - \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$	$\frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{нз1}} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{нз2}} - \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$	$\frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{нз1}} - e^{-g_c} \dot{e}_{\text{нз2}} - \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$	
1y	$-\frac{1}{2} \left[ Z_{c1} i_{\text{нy1}} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \times \right.$ $\left. \times (Z_{c2} i_{\text{нy2}} - \dot{e}_{\text{нз2}}) \right]$	$-\frac{1}{2} \left[ Z_{c1} i_{\text{нy1}} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} \times \right.$ $\left. \times (Z_{c2} i_{\text{нy2}} - \dot{e}_{\text{нз2}}) \right]$	$-\frac{1}{2} \left[ Z_{c1} i_{\text{нy1}} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} \times \right.$ $\left. \times (Z_{c2} i_{\text{нy2}} - \dot{e}_{\text{нз2}}) \right]$	$-\frac{1}{2} \left[ Z_c i_{\text{нy1}} - e^{-g_c} (Z_c i_{\text{нy2}} - \dot{e}_{\text{нз2}}) \right]$		
2a	$i_{\text{нс1}} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{\text{нa}} - i_{\text{нa}} + \right.$ $\left. + (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$	$-\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{\text{нa}} - i_{\text{нa}} + \right.$ $\left. + (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$	$-\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{\text{нa}} - i_{\text{нa}} + \right.$ $\left. + (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$	$-\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} (\dot{e}_{\text{нa}} + e^{-g_c} \dot{e}_{\text{нз2}}) - i_{\text{нa}} \right]$		
2b	$-\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{\text{нb}} - \right.$ $\left. - Z_{c2} i_{\text{нb}} - \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$	$-\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{нb}} - \right.$ $\left. - Z_{c2} i_{\text{нb}} - \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$	$-\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{нb}} - \right.$ $\left. - Z_{c2} i_{\text{нb}} - \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$	$-\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{нb}} - Z_c i_{\text{нb}} - \dot{e}_{\text{нз2}} \right]$		

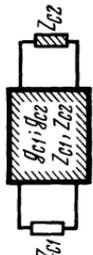
Продолжение табл. 7.9

№ пп.	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{mh} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \times (Z_{c2} i_{mh} + \dot{e}_{m2}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{mh} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \times (Z_{c2} i_{mh} + \dot{e}_{m2}) \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} [\dot{e}_{mh} + e^{-g_c} (Z_c i_{mh} + \dot{e}_{m2})]$
2f	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} (\dot{e}_{mf} - \dot{e}_{m2}) + i_{mf} \right] \times (\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m2})$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{mf} - \dot{e}_{m2}) + i_{mf} \right] \times (\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m2})$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} e^{-g_c} (\dot{e}_{mf} - \dot{e}_{m2}) + i_{mf} \right] \times (\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m2})$
2z	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m21} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \times (\dot{e}_{m22} + \dot{e}_{m2}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m21} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \times (\dot{e}_{m22} + \dot{e}_{m2}) \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} [\dot{e}_{m21} - e^{-g_c} (\dot{e}_{m22} + \dot{e}_{m2})]$
2y	$= \frac{1}{2} \left[ i_{my1} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \times (Z_{c2} i_{my2} + \dot{e}_{m2}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ i_{my1} - (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \times (Z_{c2} i_{my2} + \dot{e}_{m2}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ i_{my1} - \frac{1}{Z_c} e^{-g_c} (Z_c i_{my2} + \dot{e}_{m2}) \right]$



№ п/п.	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$		$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$		$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	
	3a	$U_{\text{шс2}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] e^{-g_{c1}} (e_{\text{шa}} + Z_{c1} i_{\text{шa}}) - \dot{e}_{\text{ш2}}$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] e^{-g_c} (e_{\text{шa}} + Z_{c1} i_{\text{шa}}) - \dot{e}_{\text{ш2}}$	$= -\frac{1}{2} [e^{-g_c} (e_{\text{шa}} + Z_c i_{\text{шa}}) - \dot{e}_{\text{ш2}}]$		
3б	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{\text{шb}} + Z_{c2} i_{\text{шb}} + \dot{e}_{\text{ш3}}) - Z_{c2} i_{\text{шh}} - \dot{e}_{\text{ш2}}$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{\text{шb}} + Z_{c2} i_{\text{шb}} + \dot{e}_{\text{ш3}}) - Z_{c2} i_{\text{шh}} - \dot{e}_{\text{ш2}}$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{\text{шb}} + Z_c i_{\text{шb}} + \dot{e}_{\text{ш3}}) - Z_c i_{\text{шh}} - \dot{e}_{\text{ш2}}$			
3в	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] e^{-g_{c1}} \dot{e}_{\text{шh}} - Z_{c2} i_{\text{шh}} - \dot{e}_{\text{ш2}}$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] e^{-g_c} \dot{e}_{\text{шh}} - Z_{c2} i_{\text{шh}} - \dot{e}_{\text{ш2}}$	$= -\frac{1}{2} (e^{-g_c} \dot{e}_{\text{шh}} - Z_c i_{\text{шh}} - \dot{e}_{\text{ш2}})$			
3г	$= \frac{1}{2} [\dot{e}_{\text{шf}} - (Z_{c1} Z_{c2})^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c1}} i_{\text{шf}} + \dot{e}_{\text{ш2}}] - Z_{c2} i_{\text{шh}} - \dot{e}_{\text{ш2}}$	$= \frac{1}{2} [\dot{e}_{\text{шf}} - (Z_{c1} Z_{c2})^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} i_{\text{шf}} + \dot{e}_{\text{ш2}}] - Z_{c2} i_{\text{шh}} - \dot{e}_{\text{ш2}}$	$= \frac{1}{2} (e_{\text{шf}} - Z_c e^{-g_c} i_{\text{шf}} + \dot{e}_{\text{ш2}}) - Z_c i_{\text{шh}} - \dot{e}_{\text{ш2}}$			

Продолжение табл. 7.9

№ п/п.		$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$
3z	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \frac{1}{2} e^{-g_{c1}} \dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2} - \dot{e}_{mz} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \frac{1}{2} e^{-g_c} \dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2} - \dot{e}_{mz} \right]$	$= -\frac{1}{2} (e^{-g_c} \dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2} - \dot{e}_{mz})$	$= -\frac{1}{2} (e^{-g_c} \dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2} - \dot{e}_{mz})$
3y	$= \frac{1}{2} \left[ -(Z_{c1} Z_{c2})^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c1}} i_{my1} + Z_{c2} i_{my2} + \dot{e}_{mz} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ -(Z_{c1} Z_{c2})^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} i_{my1} + Z_{c2} i_{my2} + \dot{e}_{mz} \right]$	$= \frac{1}{2} [Z_c (e^{-g_c} i_{my1} + i_{my2}) + \dot{e}_{mz}]$	$= \frac{1}{2} [Z_c (e^{-g_c} i_{my1} + i_{my2}) + \dot{e}_{mz}]$
4a	$i_{mz2} = -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c1}} (\dot{e}_{ma} + Z_{c1} i_{ma}) + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mz} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{ma} + Z_{c1} i_{ma}) + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mz} \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} [e^{-g_c} (\dot{e}_{ma} + Z_c i_{ma}) + \dot{e}_{mz}]$	$= -\frac{1}{2Z_c} [e^{-g_c} (\dot{e}_{ma} + Z_c i_{ma}) + \dot{e}_{mz}]$
4b	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c2}} (\dot{e}_{mb} - \dot{e}_{mz}) + i_{mb} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c2}} (\dot{e}_{mb} - \dot{e}_{mz}) + i_{mb} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} (\dot{e}_{mb} - \dot{e}_{mz}) + i_{mb} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} (\dot{e}_{mb} - \dot{e}_{mz}) + i_{mb} \right]$



№ пп.	$Z_{C1} \neq Z_{C2}, g_{C1} \neq g_{C2}$	$Z_{C1} \neq Z_{C2}, g_{C1} = g_{C2} = g_C$	$Z_{C1} = Z_{C2} = Z_C, g_{C1} = g_{C2} = g_C$
4h	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{C1}} \dot{e}_{\text{мг}} - i_{\text{мг}} + \frac{1}{Z_{C2}} \dot{e}_{\text{мг}} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_C} \dot{e}_{\text{мг}} - i_{\text{мг}} + \frac{1}{Z_{C2}} \dot{e}_{\text{мг}} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_C} (e^{-g_C} \dot{e}_{\text{мг}} + \dot{e}_{\text{мг}}) - i_{\text{мг}} \right]$
4f	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{C2}} (\dot{e}_{\text{мг}} - \dot{e}_{\text{мг}}) - \left( \frac{Z_{C1}}{Z_{C2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{C1}} i_{\text{мг}} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{C2}} (\dot{e}_{\text{мг}} - \dot{e}_{\text{мг}}) - \left( \frac{Z_{C1}}{Z_{C2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_C} i_{\text{мг}} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_C} (\dot{e}_{\text{мг}} - \dot{e}_{\text{мг}}) - e^{-g_C} i_{\text{мг}} \right]$
4z	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{C1}} \dot{e}_{\text{мг}} - \frac{1}{Z_{C2}} (\dot{e}_{\text{мг}} - \dot{e}_{\text{мг}}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_C} \dot{e}_{\text{мг}} - \frac{1}{Z_{C2}} (\dot{e}_{\text{мг}} - \dot{e}_{\text{мг}}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_C} (e^{-g_C} \dot{e}_{\text{мг}} - \dot{e}_{\text{мг}} + \dot{e}_{\text{мг}}) \right]$
4y	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{C1}}{Z_{C2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{C1}} i_{\text{мг}} - i_{\text{мг}} + \frac{1}{Z_{C2}} \dot{e}_{\text{мг}} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{C1}}{Z_{C2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_C} i_{\text{мг}} - i_{\text{мг}} + \frac{1}{Z_{C2}} \dot{e}_{\text{мг}} \right]$	$= -\frac{1}{2} (i_{\text{мг}} - i_{\text{мг}} + \frac{1}{Z_C} \dot{e}_{\text{мг}})$

Таблица 7.10

№ мп.			$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$
	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$		
1a	$\dot{U}_{\text{мс1}} = \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{м1}} - Z_{c1} \dot{i}_{\text{ма}} + \dot{i}_{\text{ма}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{\text{м2}} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{м1}} + \dot{e}_{\text{ма}} - Z_{c1} \dot{i}_{\text{ма}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{м2}} \right]$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{\text{м1}} + \dot{e}_{\text{ма}} - Z_c \dot{i}_{\text{ма}} + e^{-g_c} \dot{e}_{\text{м2}})$	$= \frac{1}{2} (\dot{e}_{\text{м1}} + \dot{e}_{\text{ма}} - Z_c \dot{i}_{\text{ма}} + e^{-g_c} \dot{e}_{\text{м2}})$
1b	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{\text{м1}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \times \right. \\ \left. \times (\dot{e}_{\text{мб}} - Z_{c2} \dot{i}_{\text{мб}} - \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{\text{м1}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} \times \right. \\ \left. \times (\dot{e}_{\text{мб}} - Z_c \dot{i}_{\text{мб}} - \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{\text{м1}} + e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{мб}} - Z_c \dot{i}_{\text{мб}} - \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{\text{м1}} + e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{мб}} - Z_c \dot{i}_{\text{мб}} - \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$
1г	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{м1}} + \dot{e}_{\text{мг}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \times \right. \\ \left. \times (Z_{c2} \dot{i}_{\text{мг}} + \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{м1}} + \dot{e}_{\text{мг}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} \times \right. \\ \left. \times (Z_{c2} \dot{i}_{\text{мг}} + \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{м1}} + \dot{e}_{\text{мг}} + e^{-g_c} (Z_c \dot{i}_{\text{мг}} + \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{\text{м1}} + \dot{e}_{\text{мг}} + e^{-g_c} (Z_c \dot{i}_{\text{мг}} + \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$
1ф	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{\text{м1}} + Z_{c1} \dot{i}_{\text{мф}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} (\dot{e}_{\text{мф}} - \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{\text{м1}} + Z_{c1} \dot{i}_{\text{мф}} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{мф}} - \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{\text{м1}} + Z_c \dot{i}_{\text{мф}} + e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{мф}} - \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{\text{м1}} + Z_c \dot{i}_{\text{мф}} + e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{мф}} - \dot{e}_{\text{м2}}) \right]$

№ пп.			$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$		
1z	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m21} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \times \right. \\ \left. \times (\dot{e}_{m22} - \dot{e}_{m2}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m21} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} \times \right. \\ \left. \times (\dot{e}_{m22} - \dot{e}_{m2}) \right]$		$= \frac{1}{2} \left[ \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m21} - e^{-g_c} (\dot{e}_{m22} - \dot{e}_{m2}) \right]$
1y	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{m1} + Z_{c1} i_{m1y1} - \right. \\ \left. - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} (Z_{c2} i_{m1y2} - \dot{e}_{m2}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{m1} + Z_{c1} i_{m1y1} - \right. \\ \left. - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-g_c} (Z_{c2} i_{m1y2} - \dot{e}_{m2}) \right]$		$= -\frac{1}{2} \left[ -\dot{e}_{m1} + Z_c i_{m1y1} - \right. \\ \left. - e^{-g_c} (Z_c i_{m1y2} - \dot{e}_{m2}) \right]$
2a	$i_{m1c1} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) - i_{m2a} + \right. \\ \left. + (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \dot{e}_{m2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) - i_{m2a} + \right. \\ \left. + (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{m2} \right]$		$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) - i_{m2a} + \right. \\ \left. + e^{-g_c} \dot{e}_{m2} - i_{m2a} \right]$
2b	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c2}} \times \right. \\ \left. \times (\dot{e}_{m1b} - Z_{c2} i_{m1b} - \dot{e}_{m2}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \times \right. \\ \left. \times (\dot{e}_{m1b} - Z_{c2} i_{m1b} - \dot{e}_{m2}) \right]$		$= \frac{1}{2Z_c} \left[ \dot{e}_{m1} + e^{-g_c} (\dot{e}_{m1b} - Z_c i_{m1b} - \dot{e}_{m2}) \right]$

Продолжение табл. 7.10

№ шт.		$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
2h	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) + \frac{1}{Z_{c2}} (-\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m2h}) \right] + (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} e^{-g_c} (Z_{c2} i_{mh} + \dot{e}_{m2h})$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh}) + \frac{1}{Z_{c2}} (-\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m2h}) \right] + (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} e^{-g_c} (Z_{c2} i_{mh} + \dot{e}_{m2h})$	$= -\frac{1}{2Z_c} [-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mh} + e^{-g_c} \times (Z_c i_{mh} + \dot{e}_{m2})]$	
2f	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + i_{mf} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} \frac{1}{2} \times e^{-g_{c2}} (\dot{e}_{mf} - \dot{e}_{m2}) \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + i_{mf} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} \frac{1}{2} \times e^{-g_c} (\dot{e}_{mf} - \dot{e}_{m2}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + i_{mf} + (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} \frac{1}{2} \times e^{-g_c} (\dot{e}_{mf} - \dot{e}_{m2}) \right]$	$= \frac{1}{2Z_c} [\dot{e}_{m1} + Z_c i_{mf} + e^{-g_c} \times (\dot{e}_{mf} - \dot{e}_{m2})]$	
2z	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m21}) - \frac{1}{Z_{c2}} (-\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m22}) \right] - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} e^{-g_c} (\dot{e}_{m22} - \dot{e}_{m2})$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m21}) - \frac{1}{Z_{c2}} (-\dot{e}_{m2} + \dot{e}_{m22}) \right] - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} e^{-g_c} (\dot{e}_{m22} - \dot{e}_{m2})$	$= -\frac{1}{2Z_c} [-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m21} - e^{-g_c} \times (\dot{e}_{m22} - \dot{e}_{m2})]$	
2y	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + i_{my1} - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{m2} + i_{my2} + \dot{e}_{m2} \right] - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} e^{-g_c} (Z_{c2} i_{my2} + \dot{e}_{m2})$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z_{c1}} \dot{e}_{m1} + i_{my1} - \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{m2} + i_{my2} + \dot{e}_{m2} \right] - (Z_{c1} Z_{c2})^{-1} e^{-g_c} (Z_{c2} i_{my2} + \dot{e}_{m2})$	$= \frac{1}{2Z_c} [\dot{e}_{m1} + Z_c i_{my1} - e^{-g_c} \times (Z_c i_{my2} + \dot{e}_{m2})]$	



№ пп.	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
3а	$U_{\text{шс2}} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] \frac{1}{2} e^{-g_{c1}} (-\dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{шa}} + Z_{c1} \dot{i}_{\text{шa}}) - \dot{e}_{\text{ш2}} \]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] \frac{1}{2} e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{шa}} + Z_{c1} \dot{i}_{\text{шa}}) - \dot{e}_{\text{ш2}} \]$	$= -\frac{1}{2} [e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш1}} - \dot{e}_{\text{шa}} + Z_c \dot{i}_{\text{шa}}) - \dot{e}_{\text{ш2}}]$
3б	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] \frac{1}{2} e^{-g_{c1}} \dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{шb}} + Z_{c2} \dot{i}_{\text{шb}} + \dot{e}_{\text{ш2}} \]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] \frac{1}{2} e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{шb}} + Z_{c2} \dot{i}_{\text{шb}} + \dot{e}_{\text{ш2}} \]$	$= \frac{1}{2} (e^{-g_c} \dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{шb}} + Z_c \dot{i}_{\text{шb}} + \dot{e}_{\text{ш2}})$
3г	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] \frac{1}{2} e^{-g_{c1}} (-\dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{шb}}) - Z_{c2} \dot{i}_{\text{шb}} - \dot{e}_{\text{ш2}} \]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] \frac{1}{2} e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{шb}}) - Z_{c2} \dot{i}_{\text{шb}} - \dot{e}_{\text{ш2}} \]$	$= -\frac{1}{2} [e^{-g_c} (-\dot{e}_{\text{ш1}} + \dot{e}_{\text{шb}}) - Z_c \dot{i}_{\text{шb}} - \dot{e}_{\text{ш2}}]$
3д	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] \frac{1}{2} e^{-g_{c1}} (\dot{e}_{\text{ш1}} - Z_{c1} \dot{i}_{\text{шf}}) + \dot{e}_{\text{шf}} + \dot{e}_{\text{ш2}} \]$	$= \frac{1}{2} \left[ \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right] \frac{1}{2} e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{ш1}} - Z_{c1} \dot{i}_{\text{шf}}) + \dot{e}_{\text{шf}} + \dot{e}_{\text{ш2}} \]$	$= \frac{1}{2} [e^{-g_c} (\dot{e}_{\text{ш1}} - Z_c \dot{i}_{\text{шf}}) + \dot{e}_{\text{шf}} + \dot{e}_{\text{ш2}}]$

Продолжение табл. 7.10

№ шт.			$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} \neq g_{c2}$			
3z	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right) \frac{1}{2} e^{-g_{c1}} (-\dot{e}_{m11} + \dot{e}_{mz1}) - \dot{e}_{mz2} - \dot{e}_{m12} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right) \frac{1}{2} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) - \dot{e}_{mz2} - \dot{e}_{m12} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) - \dot{e}_{mz2} - \dot{e}_{m12} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_c i_{my1}) + Z_{c2} i_{my2} + \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} \left[ e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) + Z_c i_{ma} + \dot{e}_{mz2} \right]$
3y	$= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right) \frac{1}{2} e^{-g_{c1}} (\dot{e}_{m1} - Z_{c1} i_{my1}) + Z_{c2} i_{my2} + \dot{e}_{mz2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right) \frac{1}{2} e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_{c1} i_{my1}) + Z_{c2} i_{my2} + \dot{e}_{mz2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - Z_c i_{my1}) + Z_{c2} i_{my2} + \dot{e}_{mz2} \right]$	$= \frac{1}{2Z_c} \left[ e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) + Z_c i_{ma} + \dot{e}_{mz2} \right]$	$= \frac{1}{2Z_c} (e^{-g_c} \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2} + Z_c i_{mb})$
4a	$i_{mc2} = -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c1}} \times (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) + Z_{c1} i_{ma} + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) + Z_{c1} i_{ma} + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) + Z_{c1} i_{ma} + \frac{1}{Z_{c2}} \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} \left[ e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1}) + Z_c i_{ma} + \dot{e}_{mz2} \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} (e^{-g_c} \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2} + Z_c i_{mb})$
4b	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{c1}} \dot{e}_{m1} + \frac{1}{Z_{c2}} (\dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2}) + i_{mb} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{c1} Z_{c2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} \dot{e}_{m1} + \frac{1}{Z_{c2}} (\dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2}) + i_{mb} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ e^{-g_c} \dot{e}_{m1} + \frac{1}{Z_c} (\dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2}) + i_{mb} \right]$	$= \frac{1}{2Z_c} \left[ e^{-g_c} \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2} + Z_c i_{mb} \right]$	$= \frac{1}{2Z_c} (e^{-g_c} \dot{e}_{m1} + \dot{e}_{mz1} - \dot{e}_{mz2} + Z_c i_{mb})$

Продолжение табл. 7.10

№ пп.			$Z_{C1} \neq Z_{C2}, \quad g_{C1} \neq g_{C2} = g_c$	$Z_{C1} = Z_{C2} = Z_c, \quad g_{C1} = g_{C2} = g_c$
	$Z_{C1} \neq Z_{C2}, \quad Z_{C1} \neq g_{C2}$	$g_{C1} \neq Z_{C2}, \quad g_{C1} = g_{C2} = g_c$		
4h	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{C1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) + \dot{e}_{mh} - i_{mh} + \frac{1}{Z_{C2}} \dot{e}_{m2} \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) + \dot{e}_{mh} - i_{mh} + \frac{1}{Z_{C2}} \dot{e}_{m2} \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} \left[ e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) - Z_c i_{mh} + \dot{e}_{m2} \right]$	
4f	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{C1}} (\dot{e}_{m1} - \dot{e}_{m2}) + \dot{e}_{mf} + \frac{1}{Z_{C2}} (\dot{e}_{mf} - \dot{e}_{m2}) \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - \dot{e}_{m2}) - Z_{C1} \dot{e}_{mf} + \frac{1}{Z_{C2}} (\dot{e}_{mf} - \dot{e}_{m2}) \right]$	$= \frac{1}{2Z_c} \left[ e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - \dot{e}_{m2}) + \dot{e}_{mf} - \dot{e}_{m2} \right]$	
4z	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{C1}} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) + \dot{e}_{mz1} + \frac{1}{Z_{C2}} (-\dot{e}_{mz2} + \dot{e}_{m2}) \right]$	$= -\frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) + \dot{e}_{mz1} + \frac{1}{Z_{C2}} (-\dot{e}_{mz2} + \dot{e}_{m2}) \right]$	$= -\frac{1}{2Z_c} \left[ e^{-g_c} (-\dot{e}_{m1} + \dot{e}_{m2}) - \dot{e}_{mz2} + \dot{e}_{m2} \right]$	
4y	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_{C1}} (\dot{e}_{m1} - \dot{e}_{m2}) - Z_{C1} \dot{e}_{my1} + i_{my2} - \frac{1}{Z_{C2}} \dot{e}_{m2} \right]$	$= \frac{1}{2} \left[ (Z_{C1} Z_{C2})^{-\frac{1}{2}} e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - \dot{e}_{m2}) - Z_{C1} \dot{e}_{my1} + i_{my2} - \frac{1}{Z_{C2}} \dot{e}_{m2} \right]$	$= 2Z_c \left[ e^{-g_c} (\dot{e}_{m1} - \dot{e}_{m2}) + \dot{e}_{my2} - \dot{e}_{m2} \right]$	

## ВЛИЯНИЕ НЕСОГЛАСОВАННОСТИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ШУМА

### 8.1. ПОКАЗАТЕЛИ РАССОГЛАСОВАННОСТИ

**В** системах обработки и передачи информации стремятся к согласованию трактов с источником сигнала и нагрузкой. Во многих случаях добиваются также согласованного включения образующих их активных и пассивных функциональных узлов — усилителей, фильтров, корректоров и других устройств [2, 12, 28, 41, 47]. Несогласованность может служить причиной амплитудно-частотных искажений и неблагоприятно сказываться при передаче сигналов связи на дальние расстояния [6, 18, 33, 100].

Влияние рассогласования на передающие свойства электрических цепей достаточно подробно изучено, взаимосвязь же несогласованности и показателей шума обобщенной системы остается нераскрытой. Согласование электрических цепей с высокой степенью точности в производственных условиях связано с серьезными затруднениями. Наличие разброса параметров элементов, зависимость их от температуры, старение — все это в конечном счете влияет на согласованность. Допустимая величина последней определяется требованиями, предъявляемыми к параметрам системы, и обычно задается коэффициентами отражения [62]:

$$\rho_1 = \frac{Z_1 - Z_{c1}}{Z_1 + Z_{c1}}, \quad \rho_2 = \frac{Z_2 - Z_{c2}}{Z_2 + Z_{c2}}, \quad (8.1)$$

которые в общем случае являются комплексными величинами.

Рассмотрим влияние рассогласования на шумовые токи и напряжения, возникающие во внешних цепях системы под воздействием флуктуаций в источнике сигнала, четырехполюснике и нагрузке.

### 8.2. ШУМОВЫЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ

*Рассогласование слева и справа*  $\rho_1 \neq 0$ ,  $\rho_2 \neq 0$ . Общий случай несогласованного включения четырехполюсника, соответствующий выполнению неравенств  $Z_1 \neq Z_{c1}$  и  $Z_2 \neq Z_{c2}$ , рассматривался выше и представлен для передачи

сигнала слева направо на рис. 7.1а и справа налево на рис. 7.1б. Шумовые токи и напряжения между его выводами возникают под воздействием совокупности всех флуктуаций, которые статистически независимы, исключая внутренние шумы четырехполюсника. Вначале определим шумовые токи и напряжения, возникающие под воздействием отдельных источников флуктуаций, в частности, от возникающих в сопротивлении  $Z_1$  и учитываемых задающим источником шума  $\dot{e}_{ш1}$ .

Воспользуемся формулами табл. 7.1, после соответствующих подстановок и промежуточных преобразований найдем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ш1} &= \frac{1}{H_a} (a_{11} Z_2 + a_{12}) \dot{e}_{ш1} = \\ &= \frac{1 - p_1}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} [1 + p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}] \dot{U}_{шc1}, \end{aligned} \quad (8.2)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ш1} &= \frac{1}{H_a} (a_{21} Z_2 + a_{22}) \dot{e}_{ш1} = \\ &= \frac{1 - p_1}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} [1 - p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}] \dot{I}_{шc1}, \end{aligned} \quad (8.3)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ш2} &= \frac{1}{H_a} Z_2 \dot{e}_{ш1} = \\ &= \frac{(1 - p_1)(1 + p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{U}_{шc1}, \end{aligned} \quad (8.4)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ш2} &= \frac{1}{H_a} \dot{e}_{ш1} = \\ &= \frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{I}_{шc1}, \end{aligned} \quad (8.5)$$

где  $\dot{U}_{шc1} = \frac{1}{2} \dot{e}_{ш1}$  и  $\dot{I}_{шc1} = \frac{1}{2Z_{c1}} \dot{e}_{ш1}$ .

Переходя далее к средним квадратам токов и напряжений, определим:

$$|\overline{U_{ш1}}|^2 = \frac{|1 - p_1|^2}{|1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} |1 + p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2 |\overline{U_{шc1}}|^2, \quad (8.6)$$

$$|\overline{I_{ш1}}|^2 = \frac{|1 - p_1|^2}{|1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} |1 - p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2 |\overline{I_{шc1}}|^2, \quad (8.7)$$

$$|\dot{U}_{\text{ш2}}|^2 = \frac{|(1-p_1)(1+p_2)|^2}{|1-p_1 p_2 e^{-(g_{c1}+g_{c2})}|^2} \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c1}} |\overline{U_{\text{шc1}}}|^2. \quad (8.8)$$

$$|\overline{I_{\text{ш2}}}|^2 = \frac{|(1-p_1)(1+p_2)|^2}{|1-p_1 p_2 e^{-(g_{c1}+g_{c2})}|^2} \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{-2a_{c1}} |\overline{I_{\text{шc1}}}|^2. \quad (8.9)$$

*Рассогласование слева*  $p_1 \neq 0, p_2 = 0$ . При несогласованности слева  $Z_1 \neq Z_{c1}, Z_2 = Z_{c2}$ . Подставляя эти условия в (8.2) — (8.5), получим:

$$\dot{U}_{\text{ш1}} = (1-p_1) \dot{U}_{\text{шc1}}, \quad \dot{I}_{\text{ш1}} = (1-p_1) \dot{I}_{\text{шc1}}, \quad (8.10)$$

$$\dot{U}_{\text{ш2}} = (1-p_1) \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{U}_{\text{шc1}},$$

$$\dot{I}_{\text{ш2}} = (1-p_1) \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{I}_{\text{шc1}} \quad (8.11)$$

и соответствующие им средние квадраты:

$$|\overline{U_{\text{ш1}}}|^2 = |1-p_1|^2 |\overline{U_{\text{шc1}}}|^2, \quad |\overline{I_{\text{шc1}}}|^2 = |1-p_1|^2 |\overline{I_{\text{шc1}}}|^2, \quad (8.12)$$

$$|\overline{U_{\text{ш2}}}|^2 = |1-p_1|^2 \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c1}} |\overline{U_{\text{шc1}}}|^2,$$

$$|\overline{I_{\text{ш2}}}|^2 = |1-p_1|^2 \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{-2a_{c1}} |\overline{I_{\text{шc1}}}|^2. \quad (8.13)$$

*Рассогласование справа*  $p_1 = 0, p_2 \neq 0$ . При несогласованности справа  $Z_1 = Z_{c1}$  и  $Z_2 \neq Z_{c2}$ . Подставив в (8.2) — (8.5) означенные условия, получим:

$$\dot{U}_{\text{ш1}} = [1 + p_2 e^{-(g_{c1}+g_{c2})}] \dot{U}_{\text{шc1}},$$

$$\dot{I}_{\text{ш1}} = [1 - p_2 e^{-(g_{c1}+g_{c2})}] \dot{I}_{\text{шc1}}, \quad (8.14)$$

$$\dot{U}_{\text{ш2}} = (1+p_2) \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{U}_{\text{шc1}},$$

$$\dot{I}_{\text{ш2}} = (1-p_2) \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{I}_{\text{шc1}} \quad (8.15)$$

и их средние квадраты:

$$|\overline{U_{\text{ш1}}}|^2 = |1 + p_2 e^{-(g_{c1}+g_{c2})}|^2 |\overline{U_{\text{шc1}}}|^2,$$

$$|\overline{I_{\text{ш1}}}|^2 = |1 - p_2 e^{-(g_{c1}+g_{c2})}|^2 |\overline{I_{\text{шc1}}}|^2, \quad (8.16)$$

$$|\overline{U_{\text{ш2}}}|^2 = |1 + p_2|^2 \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c1}} |\overline{U_{\text{шc1}}}|^2,$$

$$|\overline{I_{\text{ш2}}}|^2 = |1 - p_2|^2 \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{-2a_{c1}} |\overline{I_{\text{шc1}}}|^2. \quad (8.17)$$

Шумовые токи и напряжения от флуктуаций в сопротивлении  $Z_2$  учтем задающим источником  $e_{ш2}$ . Воспользовавшись формулами табл. 7.2, определим:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{ш1} &= \frac{1}{H_a} (a_{22} Z_1 + a_{12}) \dot{e}_{ш2} = \frac{1 - p_2}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} \times \\ &\times \left[ 1 + p_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} \right] \dot{U}_{шc2}, \end{aligned} \quad (8.18)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}'_{ш1} &= \frac{1}{H_a} (a_{21} Z_1 + a_{11}) \dot{e}_{ш2} = \frac{1 - p_2}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} \times \\ &\times \left[ 1 - p_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} \right] \dot{I}_{шc2}, \end{aligned} \quad (8.19)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{ш2} &= \frac{1}{H_a} \Delta a Z_1 \dot{e}_{ш2} = \frac{(1 + p_1)(1 - p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} \times \\ &\times \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{U}_{шc2}, \end{aligned} \quad (8.20)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}'_{ш2} &= \frac{1}{H_a} \Delta a \dot{e}_{ш2} = \frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{I}_{шc2} \end{aligned} \quad (8.21)$$

и средние квадраты:

$$\overline{|U'_{ш1}|^2} = \frac{|1 - p_2|^2}{|1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \left| 1 + p_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} \right|^2 \overline{|U_{шc2}|^2} \quad (8.22)$$

$$\overline{|I'_{ш1}|^2} = \frac{|1 - p_2|^2}{|1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \left| 1 - p_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} \right|^2 \overline{|I_{шc2}|^2}, \quad (8.23)$$

$$\overline{|U'_{шc2}|^2} = \frac{|(1 + p_1)(1 - p_2)|^2}{|1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{-2a_{c2}} \overline{|U_{шc2}|^2}, \quad (8.24)$$

$$\overline{|I'_{шc2}|^2} = \frac{|(1 - p_1)(1 - p_2)|^2}{|1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c2}} \overline{|I_{шc2}|^2}. \quad (8.25)$$

Рассогласование слева  $p_1 \neq 0$ ,  $p_2 = 0$ . При несогласованности слева  $Z_1 \neq Z_{c1}$  и  $Z_2 = Z_{c2}$ . Подставив эти условия в (8.18) — (8.21), получим:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{ш1} &= \left[ 1 + p_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} \right] \dot{U}_{шc2}, \\ \dot{I}'_{ш1} &= \left[ 1 - p_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} \right] \dot{I}_{шc2}, \end{aligned} \quad (8.26)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{ш2} &= (1 + \rho_1) \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{U}_{шc2}, \\ \dot{I}'_{ш2} &= (1 - \rho_1) \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{I}_{шc2} \end{aligned} \quad (8.27)$$

и их средние квадраты:

$$\begin{aligned} |\overline{U'_{ш1}}|^2 &= |1 + \rho_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2 |\overline{U_{шc2}}|^2, \\ |\overline{I'_{ш1}}|^2 &= |1 - \rho_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2 |\overline{I_{шc2}}|^2, \end{aligned} \quad (8.28)$$

$$\begin{aligned} |\overline{U'_{ш2}}|^2 &= |1 + \rho_1|^2 \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{-2a_{c2}} |\overline{U_{шc2}}|^2, \\ |\overline{I'_{ш2}}|^2 &= |1 - \rho_1|^2 \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c2}} |\overline{I_{шc2}}|^2. \end{aligned} \quad (8.29)$$

Рассогласование справа  $\rho_1 = 0$ ,  $\rho_2 \neq 0$ . При несогласованности справа  $Z_1 = Z_{c1}$  и  $Z_2 \neq Z_{c2}$ . Подставив эти условия в (8.18) — (8.21), получим:

$$\dot{U}'_{ш1} = (1 - \rho_2) \dot{U}_{шc2}, \quad \dot{I}'_{ш1} = (1 - \rho) \dot{I}_{шc2}, \quad (8.30)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{ш2} &= (1 - \rho_2) \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{U}_{шc2}, \\ \dot{I}'_{ш2} &= (1 - \rho_2) \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{I}_{шc2} \end{aligned} \quad (8.31)$$

и их средние квадраты:

$$|\overline{U'_{ш1}}|^2 = |1 - \rho_2|^2 |\overline{U_{шc2}}|^2, \quad |\overline{I'_{ш1}}|^2 = |1 - \rho_2|^2 |\overline{I_{шc2}}|^2, \quad (8.32)$$

$$\begin{aligned} |\overline{U'_{ш2}}|^2 &= |1 - \rho_2|^2 \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{-2a_{c2}} |\overline{U_{шc2}}|^2, \\ |\overline{I'_{ш2}}|^2 &= |1 - \rho_2|^2 \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c2}} |\overline{I_{шc2}}|^2. \end{aligned} \quad (8.33)$$

Шумовые напряжения и токи от внутренних флуктуаций четырехполюсника (рис. 8.1а) определим, воспользовавшись способом дополнения сопротивлений [34].

Представим  $Z_1 = Z_{c1} + (Z_1 - Z_{c1})$  и  $Z_2 = Z_{c2} + (Z_2 - Z_{c2})$  (рис. 8.1б), затем введем компенсирующие источники напряжения:  $e_{шк1}(Z_1 - Z_{c1})\dot{I}_{ш1}$  и  $e_{шк2} = (Z_2 - Z_{c2})\dot{I}_{ш2}$  (рис. 8.1в). После этого запишем

$$\dot{U}_{ш1} = \dot{U}_{шc1} + \dot{U}_{шк1} + \dot{U}'_{шк2}, \quad \dot{I}_{ш1} = \dot{I}_{шc1} - \dot{I}_{шк1} - \dot{I}'_{шк2}, \quad (8.34)$$

$$\dot{U}_{ш2} = \dot{U}_{шc2} + \dot{U}_{шк1} + \dot{U}'_{шк2}, \quad \dot{I}_{ш2} = \dot{I}_{шc2} - \dot{I}_{шк1} - \dot{I}'_{шк2}, \quad (8.35)$$

где  $\dot{U}_{шк1}$ ,  $\dot{U}'_{шк2}$ ,  $\dot{U}'_{шк1}$ ,  $\dot{U}_{шк2}$  и  $\dot{I}_{шк1}$ ,  $\dot{I}'_{шк2}$ ,  $\dot{I}'_{шк1}$ ,  $\dot{I}_{шк2}$  — шумовые напряжения и токи, возникающие под воздействием компенсирующих источников.

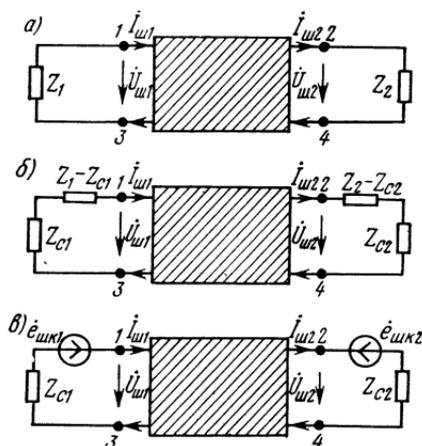


Рис. 8.1. Шумящий четырехполюсник, нагруженный на сопротивления, отличающиеся от характеристических (а); с дополнительными сопротивлениями (б); с компенсирующими шумовыми источниками (в)

Компенсирующие шумовые токи в цепях слева и справа равны

$$\dot{I}_{шк1} = [(Z_1 - Z_{c1}) \dot{I}_{ш1}] / 2Z_{c1} \quad \text{и} \quad \dot{I}_{шк2} = [(Z_2 - Z_{c2}) \dot{I}_{ш2}] / 2Z_{c2}.$$

Суммировав все составляющие, опустив промежуточные выкладки, получим:

$$\dot{I}_{ш1} = \frac{2Z_{c1}}{Z_1 + Z_{c2}} \left[ \dot{I}_{шc1} - \frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_{c2}} (Z_2 - Z_{c2}) \dot{I}_{ш2} \right], \quad (8.36)$$

$$\dot{I}_{ш2} = \frac{2Z_{c2}}{Z_2 + Z_{c2}} \left[ \dot{I}_{шc2} - \frac{1}{2} (Z_{c1} Z_{c2})^{-1/2} e^{-g_{c2}} (Z_1 - Z_{c1}) \dot{I}_{ш1} \right]. \quad (8.37)$$

Подставив (8.36) и (8.37) в полученные соотношения, учтя (8.1), найдем:

$$I_{ш1} = \frac{1 - p_1}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} \left[ I_{шc1} - \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} p_2 I_{шc2} \right], \quad (8.38)$$

$$I_{ш2} = \frac{1 - p_2}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} \left[ I_{шc2} - \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} p_1 I_{шc1} \right]. \quad (8.39)$$

Используя соотношения  $U_{ш1} = -Z_1 I_{ш1}$  и  $U_{ш2} = Z_2 I_{ш2}$ , определим:

$$\dot{U}_{ш1} = \frac{1 + p_1}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} \left[ \dot{U}_{шc1} + \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} p_2 \dot{U}_{шc2} \right], \quad (8.40)$$

$$\dot{U}_{ш2} = \frac{1 + p_2}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} \left[ \dot{U}_{шc2} + \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} p_1 \dot{U}_{шc1} \right]. \quad (8.41)$$

Переходя далее к средним квадратам, получим:

$$\begin{aligned} \overline{|U_{ш1}|^2} &= \frac{|1 + p_1|^2}{|1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \left[ (1 - |\gamma_c|^2) \overline{|U_{шc1}|^2} + \right. \\ &+ \left. \left| \left( \frac{\overline{|U_{шc1}|^2}}{\overline{|U_{шc2}|^2}} \right)^{1/2} \gamma_c + p_2 \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \right|^2 \overline{|U_{шc2}|^2} \right], \quad (8.42) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{|I_{ш1}|^2} &= \frac{|1 - p_1|^2}{|1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \left[ (1 - |\gamma_c|^2) \overline{|I_{шc1}|^2} + \right. \\ &+ \left. \left| \left( \frac{\overline{|I_{шc1}|^2}}{\overline{|I_{шc2}|^2}} \right)^{1/2} \gamma_c - p_2 \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \right|^2 \overline{|I_{шc2}|^2} \right], \quad (8.43) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{|U_{ш2}|^2} &= \frac{|1 + p_2|^2}{|1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \left[ (1 - |\gamma_c|^2) \overline{|U_{шc2}|^2} + \right. \\ &+ \left. \left| \left( \frac{\overline{|U_{шc2}|^2}}{\overline{|U_{шc1}|^2}} \right)^{1/2} \gamma_c + p_1 \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \right|^2 \overline{|U_{шc1}|^2} \right], \quad (8.44) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{|I_{ш2}|^2} &= \frac{|1 - p_2|^2}{|1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \left[ (1 - |\gamma_c|^2) \overline{|I_{шc2}|^2} + \right. \\ &+ \left. \left| \left( \frac{\overline{|I_{шc2}|^2}}{\overline{|I_{шc1}|^2}} \right)^{1/2} \gamma_c - p_1 \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \right|^2 \overline{|I_{шc1}|^2} \right]. \quad (8.45) \end{aligned}$$

Рассогласование слева  $p_1 \neq 0$ ,  $p_2 = 0$ . Подставляя исходные условия в (8.38) — (8.41), определим:

$$\dot{U}_{\text{ш1}} = (1 + p_1) \dot{U}_{\text{шc1}}, \quad \dot{I}_{\text{ш1}} = (1 - p_1) \dot{I}_{\text{шc1}}, \quad (8.46)$$

$$\dot{U}_{\text{ш2}} = \dot{U}_{\text{шc2}} + p_1 \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{U}_{\text{шc1}},$$

$$\dot{I}_{\text{ш2}} = \dot{I}_{\text{шc2}} - p_2 \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \dot{I}_{\text{шc1}} \quad (8.47)$$

и средние квадраты:

$$\overline{|U_{\text{ш1}}|^2} = |1 + p_1|^2 \overline{|U_{\text{шc1}}|^2}, \quad (8.48)$$

$$\overline{|I_{\text{ш1}}|^2} = |1 - p_1|^2 \overline{|I_{\text{шc1}}|^2}, \quad (8.49)$$

$$\begin{aligned} \overline{|U_{\text{ш2}}|^2} &= (1 - |\gamma_c|^2) \overline{|U_{\text{шc2}}|^2} + \left| \left( \frac{\overline{|U_{\text{шc2}}|^2}}{\overline{|U_{\text{шc1}}|^2}} \right)^{1/2} \gamma_c + \right. \\ &+ \left. p_1 \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \right|^2 \overline{|U_{\text{шc1}}|^2}, \end{aligned} \quad (8.50)$$

$$\begin{aligned} \overline{|I_{\text{ш2}}|^2} &= (1 - |\gamma_c|^2) \overline{|I_{\text{шc2}}|^2} + \left| \left( \frac{\overline{|I_{\text{шc2}}|^2}}{\overline{|I_{\text{шc1}}|^2}} \right)^{1/2} \gamma_c - \right. \\ &- \left. p_1 \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c1}} \right|^2 \overline{|I_{\text{шc1}}|^2}. \end{aligned} \quad (8.51)$$

Рассогласование справа  $p_1 = 0$ ,  $p_2 \neq 0$ . Подставив означенные условия в (8.38) — (8.41), определим:

$$\dot{U}_{\text{ш1}} = \dot{U}_{\text{шc1}} + p_2 \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{U}_{\text{шc2}},$$

$$\dot{I}_{\text{ш1}} = \dot{I}_{\text{шc1}} - p_2 \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \dot{I}_{\text{шc2}}, \quad (8.52)$$

$$\dot{U}_{\text{ш2}} = (1 + p_2) \dot{U}_{\text{шc2}}, \quad \dot{I}_{\text{ш2}} = (1 - p_2) \dot{I}_{\text{шc2}} \quad (8.53)$$

и средние квадраты:

$$\begin{aligned} \overline{|U_{\text{ш1}}|^2} &= (1 - |\gamma_c|^2) \overline{|U_{\text{шc1}}|^2} + \left| \left( \frac{\overline{|U_{\text{шc1}}|^2}}{\overline{|U_{\text{шc2}}|^2}} \right)^{1/2} \gamma_c + \right. \\ &+ \left. p_2 \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \right|^2 \overline{|U_{\text{шc2}}|^2}, \end{aligned} \quad (8.54)$$

$$\begin{aligned} \overline{|I_{\text{ш1}}|^2} &= (1 - |\gamma_c|^2) \overline{|I_{\text{шc1}}|^2} + \left| \left( \frac{\overline{|I_{\text{шc2}}|^2}}{\overline{|I_{\text{шc1}}|^2}} \right)^{1/2} \gamma_c - \right. \\ &- \left. p_2 \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_{c2}} \right|^2 \overline{|I_{\text{шc2}}|^2}, \end{aligned} \quad (8.55)$$

$$\overline{|U_{ш2}|^2} = |1 + \rho_2|^2 \overline{|U_{ш c2}|^2}, \quad (8.56)$$

$$\overline{|I_{ш2}|^2} = |1 - \rho_2|^2 \overline{|I_{ш c2}|^2}. \quad (8.57)$$

Полученные формулы относятся к обобщенного вида шумящему четырехполюснику, частными случаями которого являются обратимый несимметричный  $g_{c1}=g_{c2}=g_c$ ,  $Z_{c1} \neq Z_{c2}$  и симметричный  $g_{c1}=g_{c2}=g_c$ ,  $Z_{c1}=Z_{c2}=Z_c$  четырехполюсники. Для них по ф-лам (8.2) — (8.57) получены соотношения между шумовыми токами и напряжениями, сведенные в табл. 8.1—8.3.

*Граничный случай.* Характеристические шумовые токи и напряжения не коррелированы —  $|\gamma_c|=0$ .

Подставив в (8.42) — (8.45) исходные условия, получим:  
— при рассогласовании слева и справа  $\rho_1 \neq 0$ ,  $\rho_2 \neq 0$ :

$$\overline{|U_{ш1}|^2} = \frac{|1 + \rho_1|^2}{|1 - \rho_1 \rho_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \left( \overline{|U_{ш c1}|^2} + |\rho_2|^2 \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{-2a_{c2}} \overline{|U_{ш c2}|^2} \right), \quad (8.58)$$

$$\overline{|I_{ш1}|^2} = \frac{|1 - \rho_1|^2}{|1 - \rho_1 \rho_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \left( \overline{|I_{ш c1}|^2} + |\rho_2|^2 \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c2}} \overline{|I_{ш c2}|^2} \right), \quad (8.59)$$

$$\overline{|U_{ш2}|^2} = \frac{|1 + \rho_2|^2}{|1 - \rho_1 \rho_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \left( \overline{|U_{ш c2}|^2} + |\rho_1|^2 \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c1}} \overline{|U_{ш c1}|^2} \right), \quad (8.60)$$

$$\overline{|I_{ш2}|^2} = \frac{|1 - \rho_2|^2}{|1 - \rho_1 \rho_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}|^2} \left( \overline{|I_{ш c2}|^2} + |\rho_1|^2 \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{-2a_{c1}} \overline{|I_{ш c1}|^2} \right); \quad (8.61)$$

— при рассогласовании слева ( $\rho_1 \neq 0$ ,  $\rho_2 = 0$ ):

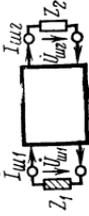
$$\overline{|U_{ш1}|^2} = |1 + \rho_1|^2 \overline{|U_{ш c1}|^2}; \quad (8.62)$$

$$\overline{|I_{ш1}|^2} = |1 - \rho_1|^2 \overline{|I_{ш c1}|^2}, \quad (8.63)$$

$$\overline{|U_{ш2}|^2} = \overline{|U_{ш c2}|^2} + |\rho_1|^2 \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c1}} \overline{|U_{ш c1}|^2}, \quad (8.64)$$

$$\overline{|I_{ш2}|^2} = \overline{|I_{ш c2}|^2} + |\rho_1|^2 \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{-2a_{c1}} \overline{|I_{ш c1}|^2}; \quad (8.65)$$

Таблица 8.1

Величина	Шумовые токи и напряжения при двухстороннем рассогласовании ( $p_1 \neq 0, p_2 \neq 0$ )		
	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$\dot{U}_{ш1}$	$\frac{1 - p_1}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} [1 + p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}] \dot{U}_{шс1}$		$\frac{1 - p_1}{1 - p_1 p_2 e^{-2g_c}} (1 + p_2 e^{-2g_c}) \dot{U}_{шс1}$
$\dot{I}_{ш1}$	$\frac{1 - p_1}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} [1 - p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}] \dot{I}_{шс1}$		$\frac{1 - p_1}{1 - p_1 p_2 e^{-2g_c}} (1 - p_2 e^{-2g_c}) \dot{I}_{шс1}$
$\dot{U}_{ш2}$	$\frac{(1 - p_1)(1 + p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} e^{-g_{c1}} \dot{U}_{шс1}$	$\left( \frac{1 - p_1}{1 - p_1 p_2 e^{-2g_c}} \right)^{1/2} \times e^{-g_c} \dot{U}_{шс1}$	$\frac{(1 - p_1)(1 + p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-2g_c}} e^{-g_c} \dot{U}_{шс1}$
$\dot{I}_{ш2}$	$\frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} e^{-g_{c1}} \dot{I}_{шс1}$	$\left( \frac{1 - p_1}{1 - p_1 p_2 e^{-2g_c}} \right)^{1/2} \times e^{-g_c} \dot{I}_{шс1}$	$\frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-2g_c}} e^{-g_c} \dot{I}_{шс1}$

Продолжение табл. 8.1

Величина	Шумовые токи и напряжения при двухстороннем рассогласовании ( $p_1 \neq 0, p_2 \neq 0$ )	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
		$ U_{ш1} ^2$	$\frac{ 1 - p_1 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2}  1 + p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2 \times$ $\times \frac{ U_{шc1} ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}$	$\frac{ 1 - p_1 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}$
$ I_{ш1} ^2$	$\frac{ 1 - p_1 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2}  1 - p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2 \times$ $\times \frac{ I_{шc1} ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}$	$\frac{ 1 - p_1 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}$	$\frac{ 1 - p_1 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}$	$ 1 - p_2 e^{-2g_c} ^2  I_{шc1} ^2$
$ U_{ш2} ^2$	$\frac{ (1 - p_1)(1 + p_2) ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2} e^{-2a_{c1}}  U_{шc1} ^2$	$\frac{ (1 - p_1)(1 + p_2) ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}  Z_{c2}  \times$ $\times e^{-2a_c}  U_{шc1} ^2$	$\frac{ (1 - p_1)(1 + p_2) ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}  Z_{c1}  \times$	$\frac{ (1 - p_1)(1 + p_2) ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2} \times e^{-2a_c}  U_{шc1} ^2$
$ I_{ш2} ^2$	$\frac{ (1 - p_1)(1 - p_2) ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2} e^{-2a_{c1}}  I_{шc1} ^2$	$\frac{ (1 - p_1)(1 - p_2) ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}  Z_{c1}  \times$ $\times e^{-2a_c}  I_{шc1} ^2$	$\frac{ (1 - p_1)(1 - p_2) ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}  Z_{c2}  \times$	$\frac{ (1 - p_1)(1 - p_2) ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2} \times e^{-2a_c}  I_{шc1} ^2$

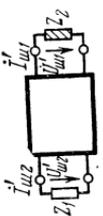
рассогласование слева ( $\rho_1 \neq 0, \rho_2 = 0$ )		
	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$   $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$\dot{U}_{\text{ш1}}$		$(1 - \rho_1) \dot{U}_{\text{шс1}}$
$\dot{I}_{\text{ш1}}$		$(1 - \rho_1) \dot{I}_{\text{шс1}}$
$\dot{U}_{\text{ш2}}$	$(1 - \rho_1) e^{-g_{c1}} \dot{U}_{\text{шс1}}$	$(1 - \rho_1) \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{U}_{\text{шс1}}$   $(1 - \rho_1) e^{-g_c} \dot{U}_{\text{шс1}}$
$\dot{I}_{\text{ш2}}$	$(1 - \rho_1) e^{-g_{c1}} \dot{I}_{\text{шс1}}$	$(1 - \rho_1) \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{I}_{\text{шс1}}$   $(1 - \rho_1) e^{-g_c} \dot{I}_{\text{шс1}}$
$ \dot{U}_{\text{ш1}} ^2$		$ 1 - \rho_1 ^2  \dot{U}_{\text{шс1}} ^2$
$ \dot{I}_{\text{ш1}} ^2$		$ 1 - \rho_1 ^2  \dot{I}_{\text{шс1}} ^2$
$ \dot{U}_{\text{ш2}} ^2$	$ 1 - \rho_1 ^2 e^{-2a_{c1}}  \dot{U}_{\text{шс1}} ^2$	$ 1 - \rho_1 ^2 \left  \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right  e^{-2a}  \dot{U}_{\text{шс1}} ^2$   $ 1 - \rho_1 ^2 e^{-2a_c}  \dot{U}_{\text{шс1}} ^2$
$ \dot{I}_{\text{ш2}} ^2$	$ 1 - \rho_1 ^2 e^{-2a_{c1}}  \dot{I}_{\text{шс1}} ^2$	$ 1 - \rho_1 ^2 \left  \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right  e^{-2a_c}  \dot{I}_{\text{шс1}} ^2$   $ 1 - \rho_1 ^2 e^{-2a_c}  \dot{I}_{\text{шс1}} ^2$

Продолжение табл. 8.1

расположение справа ( $p_1 = 0, p_2 \neq 0$ )

	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$\dot{U}_{\text{III}}$	$[1 + p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}] \dot{U}_{\text{III}c1}$	$(1 + p_2 e^{-2g_c}) \dot{U}_{\text{III}c1}$	$(1 + p_2 e^{-2g_c}) \dot{U}_{\text{III}c1}$
$i_{\text{III}}$	$[1 - p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}] i_{\text{III}c1}$	$(1 - p_2 e^{-2g_c}) i_{\text{III}c1}$	$(1 - p_2 e^{-2g_c}) i_{\text{III}c1}$
$\dot{U}_{\text{III}2}$	$(1 + p_2) e^{-g_{c1}} \dot{U}_{\text{III}c1}$	$(1 + p_2) \left(\frac{Z_{c2}}{Z_{c3}}\right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{U}_{\text{III}c1}$	$(1 + p_2) e^{-g_c} \dot{U}_{\text{III}c1}$
$i_{\text{III}2}$	$(1 - p_2) e^{-g_{c1}} i_{\text{III}c1}$	$(1 - p_2) \left(\frac{Z_{c1}}{Z_{c3}}\right)^{1/2} e^{-g_c} i_{\text{III}c1}$	$(1 - p_2) e^{-g_c} i_{\text{III}c1}$
$ U_{\text{III}1} ^2$	$ 1 + p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2  U_{\text{III}c1} ^2$	$ 1 + p_2 e^{-2g_c} ^2  U_{\text{III}c1} ^2$	$ 1 + p_2 e^{-2g_c} ^2  U_{\text{III}c1} ^2$
$ I_{\text{III}1} ^2$	$ 1 - p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2  I_{\text{III}c1} ^2$	$ 1 - p_2 e^{-2g_c} ^2  I_{\text{III}c1} ^2$	$ 1 - p_2 e^{-2g_c} ^2  I_{\text{III}c1} ^2$
$ U_{\text{III}2} ^2$	$ 1 + p_2 ^2 e^{-2a_{c1}}  U_{\text{III}c1} ^2$	$ 1 + p_2 ^2 e^{-2a_c}  U_{\text{III}c1} ^2$	$ 1 + p_2 ^2 e^{-2a_c}  U_{\text{III}c1} ^2$
$ I_{\text{III}2} ^2$	$ 1 - p_2 ^2 e^{-2a_{c1}}  I_{\text{III}c1} ^2$	$ 1 - p_2 ^2 e^{-2a_c}  I_{\text{III}c1} ^2$	$ 1 - p_2 ^2 e^{-2a_c}  I_{\text{III}c1} ^2$

Таблица 8.2

Величина	Шумовые токи и напряжения при двухстороннем рассогласовании ( $p_1 \neq 0, p_2 \neq 0$ )	 $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$U'_{ш1}$	$\frac{1 - p_2}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} [1 + p_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}] \times U_{шc2}$	$\frac{1 - p_2}{1 - p_1 p_2 e^{-2g_c}} (1 + p_1 e^{-2g_c}) U_{шc2}$ $Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$i'_{ш1}$	$\frac{1 - p_2}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} [1 - p_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}] \times i_{шc2}$	$\frac{1 - p_2}{1 - p_1 p_2 e^{-2g_c}} (1 - p_1 e^{-2g_c}) i_{шc2}$
$U'_{ш2}$	$\frac{(1 + p_1)(1 - p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} e^{-g_{c2}} U_{шc2}$	$\frac{(1 + p_1)(1 - p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-2g_c}} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} \times e^{-g_c} U_{шc2}$
$i'_{ш2}$	$\frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} e^{-g_{c2}} i_{шc2}$	$\frac{(1 - p_1)(1 - p_2)}{1 - p_1 p_2 e^{-2g_c}} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} \times e^{-g_c} i_{шc2}$

Продолжение табл. 8.2

Шумовые токи и напряжения при двухстороннем рассогласовании ( $p_1 \neq 0, p_2 \neq 0$ )	
Величина	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$ <span style="float: right;"><math>Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c</math></span>
$ U'_{ш1} ^2$	$\frac{ 1 - p_2 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})^2} ^2}  1 + p_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})^2} ^2 \times$ $\times  U_{шc2} ^2$ $\frac{ 1 - p_2 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}  1 + p_1 e^{-2g_c} ^2  U_{шc2} ^2$
$ I'_{ш1} ^2$	$\frac{ 1 - p_2 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})^2} ^2}  1 - p_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})^2} ^2 \times$ $\times  I_{шc2} ^2$ $\frac{ 1 - p_2 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2}  1 - p_1 e^{-2g_c} ^2  I_{шc2} ^2$
$ U'_{ш2} ^2$	$\frac{ (1 + p_1)(1 - p_2) ^2 e^{-2a_{c2}}}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c1})^2} ^2} e^{-2a_{c2}}  U_{шc2} ^2$ $\frac{ (1 + p_1)(1 - p_2) ^2  Z_{c2} ^{-a_c}  U_{шc2} ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2  Z_{c1} ^{-a_c}  U_{шc2} ^2} e^{-a_c} \frac{ (1 + p_1)(1 - p_2) ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2} e^{-a_c}  U_{шc2} ^2$
$ I'_{ш2} ^2$	$\frac{ (1 - p_1)(1 - p_2) ^2 e^{-2a_{c2}}}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})^2} ^2} e^{-2a_{c2}}  I_{шc2} ^2$ $\frac{ (1 - p_1)(1 - p_2) ^2  Z_{c1} ^{-a_c}  I_{шc2} ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2  Z_{c2} ^{-a_c}  I_{шc2} ^2} e^{-a_c} \frac{ (1 - p_1)(1 - p_2) ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2} e^{-a_c}  I_{шc2} ^2$

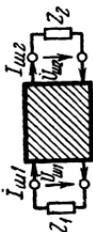
расположение слева ( $\rho_1 \neq 0, \rho_2 = 0$ )

	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, \quad g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$U'_{m1}$	$[1 + \rho_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}] \dot{U}_{mc2}$	$(1 + \rho_1 e^{-2g_c}) \dot{U}_{mc2}$	$(1 + \rho_1) \dot{U}_{mc2}$
$i'_{m1}$	$[1 + \rho_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}] i_{mc2}$	$(1 + \rho_1 e^{-2g_c}) i_{mc2}$	$(1 + \rho_1) i_{mc2}$
$U'_{m2}$	$(1 + \rho_1) e^{-g_{c2}} \dot{U}_{mc2}$	$(1 + \rho_1) \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{U}_{mc2}$	$(1 + \rho_1) e^{-g_c} \dot{U}_{mc2}$
$i'_{m2}$	$(1 - \rho_1) e^{-g_{c2}} i_{mc2}$	$(1 - \rho_1) \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_c} i_{mc2}$	$(1 - \rho_1) e^{-g_c} i_{mc2}$
$ U'_{m1} ^2$	$ 1 + \rho_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2  U_{mc2} ^2$	$ 1 + \rho_1 e^{-2g_c} ^2  U_{mc2} ^2$	$ 1 + \rho_1 ^2  U_{mc2} ^2$
$ i'_{m1} ^2$	$ 1 + \rho_1 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2  i_{mc2} ^2$	$ 1 + \rho_1 e^{-2g_c} ^2  i_{mc2} ^2$	$ 1 + \rho_1 ^2  i_{mc2} ^2$
$ U'_{m2} ^2$	$ 1 + \rho_1 ^2 e^{-2g_{c2}}  U_{mc2} ^2$	$ 1 + \rho_1 ^2 e^{-2a_c}  U_{mc2} ^2$	$ 1 + \rho_1 ^2 e^{-2a_c}  U_{mc2} ^2$
$ i'_{m2} ^2$	$ 1 - \rho_1 ^2 e^{-2a_{c2}}  i_{mc2} ^2$	$ 1 - \rho_1 ^2 \frac{ Z_{c2} }{ Z_{c1} } e^{-2a_c}  i_{mc2} ^2$	$ 1 - \rho_1 ^2 e^{-2a_c}  i_{mc2} ^2$

Продолжение табл. 8.2

располагание справа ( $p_1 = 0, p_2 \neq 0$ )		
$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$U'_{m1}$	$(1 - p_2) \dot{U}_{mc2}$	
$I'_{m1}$	$(1 - p_2) I_{mc2}$	
$U'_{m2}$	$(1 - p_2) e^{-g_{c2}} \dot{U}_{mc2}$	$(1 - p_2) e^{-g_c} \dot{U}_{mc2}$
$I'_{m2}$	$(1 - p_2) e^{-g_{c2}} I_{mc2}$	$(1 - p_2) e^{-g_c} I_{mc2}$
$ U'_{m1} ^2$	$ 1 - p_2 ^2  \dot{U}_{mc2} ^2$	
$ I'_{m1} ^2$	$ 1 - p_2 ^2  I_{mc2} ^2$	
$ U'_{m2} ^2$	$ 1 - p_2 ^2 e^{-2g_{c2}}  \dot{U}_{mc2} ^2$	$ 1 - p_2 ^2 e^{-2g_c}  \dot{U}_{mc2} ^2$
$ I'_{m2} ^2$	$ 1 - p_2 ^2 e^{-2g_{c2}}  I_{mc2} ^2$	$ 1 - p_2 ^2 e^{-2g_c}  I_{mc2} ^2$

Таблица 8.3

Величина	Шумовые токи и напряжения при двухстороннем рассогласовании ( $\rho_1 \neq 0, \rho_2 \neq 0$ )	
	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$\dot{U}_{ш1}$	$\frac{1 + \rho_1}{1 - \rho_1 \rho_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} (\dot{U}_{шc1} + \rho_2 e^{-g_{c2}} \dot{U}_{шc2})$	$\frac{1 + \rho_1}{1 - \rho_1 \rho_2 e^{-2g_c}} \times$ $\times (\dot{U}_{шc1} + \rho_1 e^{-g_c} \dot{U}_{шc2})$
$i_{ш1}$	$\frac{1 - \rho_1}{1 - \rho_1 \rho_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} (i_{шc1} - \rho_2 e^{-g_{c2}} i_{шc2})$	$\frac{1 - \rho_1}{1 - \rho_1 \rho_2 e^{-2g_c}} \times$ $\times (i_{шc1} - \rho_2 e^{-g_c} i_{шc2})$
$\dot{U}_{ш2}$	$\frac{1 + \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} (\dot{U}_{шc2} + \rho_1 e^{-g_{c1}} \dot{U}_{шc1})$	$\frac{1 + \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2 e^{-2g_c}} \times$ $\times (\dot{U}_{шc2} + \rho_1 e^{-g_c} \dot{U}_{шc1})$
$i_{ш2}$	$\frac{1 - \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})}} (i_{шc2} - \rho_1 e^{-g_{c1}} i_{шc1})$	$\frac{1 - \rho_2}{1 - \rho_1 \rho_2 e^{-2g_c}} \times$ $\times (i_{шc2} - \rho_1 e^{-g_c} i_{шc1})$

Продолжение табл. 8.3

Величина	Шумовые токи и напряжения при двухстороннем рассогласовании ( $p_1 \neq 0, p_2 \neq 0$ )	
$ U_{ш1} ^2$	$\frac{ 1 + p_1 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2} [  U_{шc1} ^2 +  p_2 ^2 e^{-2a_{c2}}  U_{шc2} ^2 ]$	$\frac{ 1 + p_1 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2} [  U_{шc1} ^2 +  p_2 ^2 \frac{ Z_{c1}  e^{-2a_c}}{ Z_{c2} }  U_{шc2} ^2 ]$
$ I_{ш1} ^2$	$\frac{ 1 - p_1 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2} [  I_{шc1} ^2 +  p_2 ^2 e^{-2a_{c2}}  I_{шc2} ^2 ]$	$\frac{ 1 - p_1 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2} [  I_{шc1} ^2 +  p_2 ^2 \frac{ Z_{c2}  e^{-2a_c}}{ Z_{c1} }  I_{шc2} ^2 ]$
$ U_{ш2} ^2$	$\frac{ 1 + p_2 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2} [  U_{шc2} ^2 +  p_1 ^2 e^{-2a_{c1}}  U_{шc1} ^2 ]$	$\frac{ 1 + p_2 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2} [  U_{шc2} ^2 +  p_1 ^2 \frac{ Z_{c2}  e^{-2a_c}}{ Z_{c1} }  U_{шc1} ^2 ]$
$ I_{ш2} ^2$	$\frac{ 1 - p_2 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-(g_{c1} + g_{c2})} ^2} [  I_{шc2} ^2 +  p_1 ^2 e^{-2a_{c1}}  I_{шc1} ^2 ]$	$\frac{ 1 - p_2 ^2}{ 1 - p_1 p_2 e^{-2g_c} ^2} [  I_{шc2} ^2 +  p_1 ^2 \frac{ Z_{c1}  e^{-2a_c}}{ Z_{c2} }  I_{шc1} ^2 ]$

		расположение слева ( $p_1 \neq 0, p_2 = 0$ )	
	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$	$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$\dot{U}_{ш1}$		$(1 + p_1) \dot{U}_{шc1}$	
$i_{ш1}$		$(1 - p_1) i_{шc1}$	
$\dot{U}_{ш2}$	$\dot{U}_{шc2} + p_1 e^{-g_{c1}} \dot{U}_{шc1}$	$\dot{U}_{шc2} + p_1 \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{U}_{шc1}$	$\dot{U}_{шc2} + p_1 e^{-g_c} \dot{U}_{шc1}$
$i_{ш2}$	$i_{шc2} - p_1 e^{-g_{c1}} i_{шc1}$	$i_{шc2} - p_1 \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_c} i_{шc1}$	$i_{шc2} - p_1 e^{-g_c} i_{шc1}$
$ \overline{U_{ш1}} ^2$		$ 1 + p_1 ^2  \overline{U_{шc1}} ^2$	
$ \overline{I_{ш1}} ^2$		$ 1 + p_1 ^2  \overline{I_{шc1}} ^2$	
$ \overline{U_{ш2}} ^2$	$ \overline{U_{шc2}} ^2 +  p_1 ^2 e^{-2a_{c1}}  \overline{U_{шc1}} ^2$	$ \overline{U_{шc2}} ^2 +  p_1 ^2 \left  \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right  e^{-2a_c}  \overline{U_{шc1}} ^2$	$ \overline{U_{шc2}} ^2 +  p_1 ^2 e^{-2a_c}  \overline{U_{шc1}} ^2$
$ \overline{I_{ш2}} ^2$	$ \overline{I_{шc2}} ^2 +  p_1 ^2 e^{-2a_{c1}}  \overline{I_{шc1}} ^2$	$ \overline{I_{шc2}} ^2 +  p_1 ^2 \left  \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right  e^{-2a_c}  \overline{I_{шc1}} ^2$	$ \overline{I_{шc2}} ^2 +  p_1 ^2 e^{-2a_c}  \overline{I_{шc1}} ^2$

		расположение справа ( $p_1 = 0, p_2 \neq 0$ )	
		$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c, g_{c1} \neq g_{c2}$	$Z_{c1} \neq Z_{c2}, g_{c1} = g_{c2} = g_c$
$\dot{U}_{ш1}$	$\dot{U}_{шc1} + p_2 e^{-g_{c2}} \dot{U}_{шc2}$	$\dot{U}_{шc1} + p_2 \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{U}_{шc2}$	$\dot{U}_{шc1} + p_2 e^{-g_c} \dot{U}_{шc2}$
$\dot{I}_{ш1}$	$\dot{I}_{шc1} - p_2 e^{-g_{c2}} \dot{I}_{шc2}$	$\dot{I}_{шc1} - p_2 \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} e^{-g_c} \dot{I}_{шc2}$	$\dot{I}_{шc1} - p_2 e^{-g_c} \dot{I}_{шc2}$
$\dot{U}_{ш2}$		$(1 + p_2) \dot{U}_{шc2}$	
$\dot{I}_{ш2}$		$(1 - p_2) \dot{I}_{шc2}$	
$ \overline{U}_{ш1} ^2$	$ \overline{U}_{шc1} ^2 +  p_2 ^2 e^{-2a_{c2}}  \overline{U}_{шc2} ^2$	$ \overline{U}_{шc1} ^2 +  p_2 ^2 \frac{ Z_{c1} }{ Z_{c2} } e^{-2a_c}  \overline{U}_{шc2} ^2$	$ \overline{U}_{шc1} ^2 +  p_2 ^2 e^{-2a_c}  \overline{U}_{шc2} ^2$
$ \overline{I}_{ш1} ^2$	$ \overline{I}_{шc1} ^2 +  p_2 ^2 e^{-2a_{c2}}  \overline{I}_{шc2} ^2$	$ \overline{I}_{шc1} ^2 +  p_2 ^2 \frac{ Z_{c2} }{ Z_{c1} } e^{-2a_c}  \overline{I}_{шc2} ^2$	$ \overline{I}_{шc1} ^2 +  p_2 ^2 e^{-2a_c}  \overline{I}_{шc2} ^2$
$ \overline{U}_{шc2} ^2$		$ 1 + p_2 ^2  \overline{U}_{шc2} ^2$	
$ \overline{I}_{шc2} ^2$		$ 1 - p_2 ^2  \overline{I}_{шc2} ^2$	

Примечание: Средние квадраты шумовых токов и напряжений получены для случая  $|\gamma_c| = 0$ .

— при рассогласовании справа ( $p_1=0, p_2 \neq 0$ ):

$$\overline{|U_{ш1}|^2} = \overline{|U_{ш\ c1}|^2} + |p_2|^2 \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} e^{-2a_{c2}} \overline{|U_{ш\ c2}|^2}, \quad (8.66)$$

$$\overline{|I_{ш1}|^2} = \overline{|I_{ш\ c1}|^2} + |p_2|^2 \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} e^{-2a_{c2}} \overline{|I_{ш\ c2}|^2}. \quad (8.67)$$

$$\overline{|U_{ш2}|^2} = |1 + p_2|^2 \overline{|U_{ш\ c2}|^2}, \quad (8.68)$$

$$\overline{|I_{ш2}|^2} = |1 - p_2|^2 \overline{|I_{ш\ c2}|^2}. \quad (8.69)$$

Перейдем далее к выяснению зависимости коэффициента шума от согласования с источником сигнала и нагрузкой.

### 8.3. НЕСОГЛАСОВАННЫЙ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК

Для выяснения зависимости коэффициента шума четырехполюсника от рассогласования слева и справа воспользуемся выражениями общего вида из табл. 2.3, приняв шумы нагрузок равными нулю. Раскрыв в них кажущиеся мощности сигнала и шума, воспользовавшись (8.8) и (8.44), опустив промежуточные выкладки, получим:

$$F_{ш1} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) |p_1|^2 R_{ш\ c1ч} + \left| p_1 \gamma_c \left( \frac{R_{ш\ c1ч}}{R_{ш\ c2ч}} \right)^{1/2} \right|^2 + \rightarrow}{|1 - p_1|^2 R_{ш1}} \rightarrow + e^{g_{c1}} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} \left| R_{ш\ c2ч} \right|^2, \quad (8.70)$$

$$F_{ш2} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) |p_2|^2 R_{ш\ c2ч} + \left| p_2 \gamma_c \left( \frac{R_{ш\ c2ч}}{R_{ш\ c1ч}} \right)^{1/2} \right|^2 + \rightarrow}{|1 - p_2|^2 R_{ш2}} \rightarrow + e^{g_{c2}} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} \left| R_{ш\ c1ч} \right|^2. \quad (8.71)$$

Эти выражения относятся к четырехполюснику обобщенного вида, обладающему свойством необратимости и отсутствием поперечной симметрии. Из них легко получить формулы коэффициентов шума для более простых четырехполюсников. Для этого достаточно подставить в (8.70) и (8.71) соответствующие им характеристические параметры.

Частный случай 1.  $g_{c1} = g_{c2} = g_c$ ,  $Z_{c1} \neq Z_{c2}$ :

$$F_{и1} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) |\rho_1|^2 R_{ш c1ч} + \left| \rho_1 \gamma_c \left( \frac{R_{ш c1ч}}{R_{ш c2ч}} \right)^{1/2} + e^{g_c} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} \right|^2 R_{ш c2ч}}{|1 - \rho_1|^2 R_{ш1}} \quad (8.72)$$

$$F_{и2} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) |\rho_2|^2 R_{ш c2ч} + \left| \rho_2 \gamma_c \left( \frac{R_{ш c2ч}}{R_{ш c1ч}} \right)^{1/2} + e^{g_c} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} \right|^2 R_{ш c1ч}}{|1 - \rho_2|^2 R_{ш2}} \quad (8.73)$$

Частный случай 2.  $g_{c1} \neq g_{c2}$ ,  $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c$ :

$$F_{и1} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) |\rho_1|^2 R_{ш c1ч} + \left| \rho_1 \gamma_c \left( \frac{R_{ш c1ч}}{R_{ш c2ч}} \right)^{1/2} + e^{g_{c1}} \right|^2 R_{ш c2ч}}{|1 - \rho_1|^2 R_{ш1}} \quad (8.74)$$

$$F_{и2} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) |\rho_2|^2 R_{ш c2ч} + \left| \rho_2 \gamma_c \left( \frac{R_{ш c2ч}}{R_{ш c1ч}} \right)^{1/2} + e^{g_{c2}} \right|^2 R_{ш c1ч}}{|1 - \rho_2|^2 R_{ш2}} \quad (8.75)$$

Частный случай 3.  $g_{c1} = g_{c2} = g_c$ ,  $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c$ :

$$F_{и1} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) |\rho_1|^2 R_{ш c1ч} + \left| \rho_1 \gamma_c \left( \frac{R_{ш c1ч}}{R_{ш c2ч}} \right)^{1/2} + e^{g_c} \right|^2 R_{ш c2ч}}{|1 - \rho_1|^2 R_{ш1}} \quad (8.76)$$

$$F_{и2} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) |\rho_2|^2 R_{ш c2ч} + \left| \rho_2 \gamma_c \left( \frac{R_{ш c2ч}}{R_{ш c1ч}} \right)^{1/2} + e^{g_c} \right|^2 R_{ш c1ч}}{|1 - \rho_2|^2 R_{ш2}} \quad (8.77)$$

Выясним влияние на коэффициенты шума четырехплюсника односторонней несогласованности:

— при рассогласовании слева (8.70) не изменяется, а (8.71) принимает вид

$$F_{и2} = \frac{e^{2a_{c2}} \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} R_{ш c1ч}}{R_{ш c2}} \quad (8.78)$$

— при рассогласовании справа (8.71) не изменится, а (8.70) принимает вид

$$F_{и1} = \frac{e^{2a_{c1}} \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} R_{ш c2ч}}{R_{ш c1}} \quad (8.79)$$

*Граничный случай.* Характеристические шумовые токи и напряжения не коррелированы  $|\gamma_c|=0$ , следовательно

$$F_{н1} = \frac{|p_1|^2 R_{ш\ c1ч} + e^{2a_{c1}} \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} R_{ш\ c2ч}}{|1 - p_1|^2 R_{ш1}},$$

$$F_{н2} = \frac{|p_2|^2 R_{ш\ c2ч} + e^{2a_{c2}} \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} R_{ш\ c1ч}}{|1 - p_2|^2 R_{ш2}}, \quad (8.80)$$

— при рассогласовании слева оказывается: для передачи справа налево коэффициент шума обращается в (8.78), а при перемене направления передачи не изменяется;

— при рассогласовании справа на основании тех же исходных данных определим: при передаче слева направо коэффициент шума обращается в (8.79), а при передаче справа налево значения не изменяет.

#### 8.4. НЕСОГЛАСОВАННАЯ СИСТЕМА

Определим влияние несогласованности на коэффициенты шума системы, представленные обобщенными формулами табл. 2.3. Выразим входящие в них кажущиеся мощности через токи и напряжения для случая двустороннего рассогласования. Используя (8.6), (8.8) и (8.22), (8.24), (8.42) и (8.44), получим:

$$F_{н1} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) |p_1|^2 R_{ш\ c1ч} + \left| p_1 \gamma_c \left( \frac{R_{ш\ c1ч}}{R_{ш\ c2ч}} \right)^{1/2} \right|^2 + \rightarrow}{|1 - p_1|^2 R_{ш1}}$$

$$\rightarrow + e^{g_{c1}} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} \left| R_{ш\ c2ч} + \left| (e^{g_{c1}} - p_1 e^{-g_{c2}}) \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} \right|^2 R_{ш2} \right|^2, \quad (8.81)$$

$$F_{н2} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) |p_2|^2 R_{ш\ c2ч} + \left| p_2 \gamma_c \left( \frac{R_{ш\ c2ч}}{R_{ш\ c1ч}} \right)^{1/2} \right|^2 + \rightarrow}{|1 - p_2|^2 R_{ш2}}$$

$$\rightarrow + e^{g_{c2}} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} \left| R_{ш\ c1ч} + \left| (e^{g_{c2}} - p_2 e^{-g_{c1}}) \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} \right|^2 R_{ш1} \right|^2. \quad (8.82)$$

Эти формулы характеризуют несогласованную систему обобщенного вида, включающую необратимый и несимметричный четырехполюсник, источник сигнала и нагрузку. Полученные выражения легко обращаются в фор-

мулы коэффициентов шума упрощенных систем подстановкой в них соответствующих показателей.

*Частный случай 1.*  $g_{c1}=g_{c2}=g_c$ ,  $Z_{c1} \neq Z_{c2}$ :

$$F_{\Pi 1} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2 | \rho_1|^2 R_{\text{ш } c1\text{ч}} + \left| \rho_1 \gamma_c \left( \frac{R_{\text{ш } c1\text{ч}}}{R_{\text{ш } c2\text{ч}}} \right)^{1/2} \right|^2 + \rightarrow}{|1 - \rho_1|^2 R_{\text{ш1}}},$$

$$\rightarrow + \frac{e^{g_c} \left( \frac{Z_{c1}}{Z_{c2}} \right)^{1/2} \left| R_{\text{ш } c2\text{ч}} + \left| e^{g_c} - \rho_1 e^{-g_c} \right|^2 \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} R_{\text{ш2}} \right|^2}{}, \quad (8.83)$$

$$F_{\Pi 2} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) | \rho_2|^2 R_{\text{ш } c2\text{ч}} + \left| \rho_2 \gamma_c \left( \frac{R_{\text{ш } c2\text{ч}}}{R_{\text{ш } c1\text{ч}}} \right)^{1/2} \right|^2 + \rightarrow}{|1 - \rho_2|^2 R_{\text{ш2}}},$$

$$\rightarrow + \frac{e^{g_c} \left( \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right)^{1/2} \left| R_{\text{ш } c1\text{ч}} + \left| e^{g_c} - \rho_2 e^{-g_c} \right|^2 \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} R_{\text{ш1}} \right|^2}{}. \quad (8.84)$$

*Частный случай 2.*  $g_{c1} \neq g_{c2}$ ,  $Z_{c1} = Z_{c2} = Z_c$ :

$$F_{\Pi 1} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) | \rho_1|^2 R_{\text{ш } c1\text{ч}} + \left| \rho_1 \gamma_c \left( \frac{R_{\text{ш } c1\text{ч}}}{R_{\text{ш } c2\text{ч}}} \right)^{1/2} \right|^2 + \rightarrow}{|1 - \rho_1|^2 R_{\text{ш1}}},$$

$$\rightarrow + \frac{e^{g_{c1}} \left| R_{\text{ш } c2\text{ч}} + \left| e^{g_{c1}} - \rho_1 e^{-g_{c2}} \right|^2 R_{\text{ш2}} \right|^2}{}, \quad (8.85)$$

$$F_{\Pi 2} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) | \rho_2|^2 R_{\text{ш } c2\text{ч}} + \left| \rho_2 \gamma_c \left( \frac{R_{\text{ш } c2\text{ч}}}{R_{\text{ш } c1\text{ч}}} \right)^{1/2} \right|^2 + \rightarrow}{|1 - \rho_2|^2 R_{\text{ш2}}},$$

$$\rightarrow + \frac{e^{g_{c2}} \left| R_{\text{ш } c1\text{ч}} + \left| e^{g_{c2}} - \rho_2 e^{-g_{c1}} \right|^2 R_{\text{ш1}} \right|^2}{}. \quad (8.86)$$

*Частный случай 3.*  $g_{c1}=g_{c2}=g_c$ ,  $Z_{c1}=Z_{c2}=Z_c$ :

$$F_{\Pi 1} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) | \rho_1|^2 R_{\text{ш } c1\text{ч}} + \left| \rho_1 \gamma_c \left( \frac{R_{\text{ш } c1\text{ч}}}{R_{\text{ш } c2\text{ч}}} \right)^{1/2} \right|^2 + \rightarrow}{|1 - \rho_1|^2 R_{\text{ш1}}},$$

$$\rightarrow + \frac{e^{g_c} \left| R_{\text{ш } c2\text{ч}} + \left| e^{g_c} - \rho_1 e^{-g_c} \right|^2 R_{\text{ш2}} \right|^2}{}, \quad (8.87)$$

$$F_{\Pi 2} = \frac{(1 - |\gamma_c|^2) | \rho_2|^2 R_{\text{ш } c2\text{ч}}^2 + \left| \rho_2 \gamma_c \left( \frac{R_{\text{ш } c2\text{ч}}}{R_{\text{ш } c1\text{ч}}} \right)^{1/2} \right|^2 + \rightarrow}{|1 - \rho_2|^2 R_{\text{ш2}}},$$

$$\rightarrow + \frac{e^{g_c} \left| R_{\text{ш } c1\text{ч}} + \left| e^{g_c} - \rho_2 e^{-g_c} \right|^2 R_{\text{ш1}} \right|^2}{}, \quad (8.88)$$

В случае односторонней несогласованности:

— при рассогласовании справа из (8.81) следует, что для передачи слева направо коэффициент шума системы не зависит от согласования справа; в обратном же направлении, как следует из (8.82), он определяется выражением

$$F_{н2} = \frac{e^{2a_{c2}} \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} (R_{ш\ c1ч} + R_{ш1})}{R_{ш\ c2}} ; \quad (8.89)$$

— при рассогласовании справа для передачи сигнала слева направо согласно (8.81) коэффициент шума системы определяется выражением

$$F_{н1} = \frac{e^{2a_{c1}} \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} (R_{ш\ c2ч} + R_{ш2})}{R_{ш\ c1}} , \quad (8.90)$$

в обратном же направлении он не изменяется — (8.82).

*Граничный случай 1.* Характеристические шумовые токи и напряжения не коррелированы  $|\gamma_c| = 0$ .

Из (8.81) и (8.82) найдем:

— при рассогласовании слева и справа:

$$F_{н1} = \frac{|p_1|^2 R_{ш\ c1ч} + e^{2a_{c1}} \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} R_{ш\ c2ч} + |e^{g_{c1}} - p_1 e^{-g_{c2}}|^2 \frac{|Z_{c1}|}{|Z_{c2}|} R_{ш2}}{|1 - p_1|^2 R_{ш1}} , \quad (8.91)$$

$$F_{н2} = \frac{|p_2|^2 R_{ш\ c2ч} + e^{2a_{c2}} \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} R_{ш\ c1ч} + |e^{g_{c2}} - p_2 e^{-g_{c1}}|^2 \frac{|Z_{c2}|}{|Z_{c1}|} R_{ш1}}{|1 - p_2|^2 R_{ш2}} ; \quad (8.92)$$

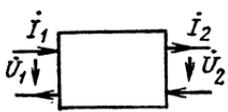
— при рассогласовании слева из (8.91) и (8.92) устанавливаем, что коэффициент шума для передачи слева направо сохраняется неизменным, а для обратного направления принимает вид (8.89)

— при рассогласовании справа аналогичным образом выясняем, что коэффициент шума остается неизменным для передачи справа налево и для обратного направления принимает вид (8.90).

Формулы обобщенных коэффициентов шума позволяют определять величину допустимого рассогласования в различных точках электрической цепи, исходя из заданных норм на шумозащищенность сигнала с учетом разброса параметров элементов. Они применимы к активным и пассивным цепям как с распределенными, так и сосредоточенными параметрами.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1

Параметр							Примечание
	$a$	$b$	$h$	$f$	$z$	$y$	
$a_{11}$	—	$\frac{b_{22}}{\Delta b}$	$-\frac{\Delta h}{h_{21}}$	$\frac{1}{f_{21}}$	$\frac{z_{11}}{z_{21}}$	$-\frac{y_{22}}{y_{21}}$	
$a_{12}$	—	$-\frac{b_{12}}{\Delta b}$	$\frac{h_{11}}{h_{21}}$	$-\frac{f_{22}}{f_{21}}$	$-\frac{\Delta z}{z_{21}}$	$\frac{1}{y_{21}}$	
$a_{21}$	—	$-\frac{b_{21}}{\Delta b}$	$-\frac{h_{22}}{h_{21}}$	$\frac{f_{11}}{f_{21}}$	$\frac{1}{z_{21}}$	$-\frac{\Delta y}{y_{21}}$	
$a_{22}$	—	$\frac{b_{11}}{\Delta b}$	$\frac{1}{h_{21}}$	$-\frac{\Delta f}{f_{21}}$	$-\frac{z_{22}}{z_{21}}$	$\frac{y_{11}}{y_{21}}$	
$b_{11}$	$\frac{a_{22}}{\Delta a}$	—	$\frac{1}{h_{12}}$	$-\frac{\Delta f}{f_{12}}$	$\frac{z_{22}}{z_{12}}$	$-\frac{y_{11}}{y_{12}}$	
$b_{12}$	$-\frac{a_{12}}{\Delta a}$	—	$-\frac{h_{11}}{h_{12}}$	$\frac{f_{22}}{f_{12}}$	$-\frac{\Delta z}{z_{12}}$	$\frac{1}{y_{12}}$	
$b_{21}$	$-\frac{a_{21}}{\Delta a}$	—	$\frac{h_{22}}{h_{12}}$	$-\frac{f_{11}}{f_{12}}$	$\frac{1}{z_{12}}$	$-\frac{\Delta y}{y_{12}}$	
$b_{22}$	$\frac{a_{11}}{\Delta a}$	—	$-\frac{\Delta h}{h_{12}}$	$\frac{1}{f_{12}}$	$-\frac{z_{11}}{z_{12}}$	$\frac{y_{22}}{y_{12}}$	
$h_{11}$	$\frac{a_{12}}{a_{22}}$	$-\frac{b_{12}}{b_{11}}$	—	$\frac{f_{22}}{\Delta f}$	$\frac{\Delta z}{z_{22}}$	$\frac{1}{y_{11}}$	$h_{11} = d_{12}$
$h_{12}$	$\frac{\Delta a}{a_{22}}$	$\frac{1}{b_{11}}$	—	$-\frac{f_{12}}{\Delta f}$	$\frac{z_{12}}{z_{22}}$	$-\frac{y_{12}}{y_{11}}$	$h_{12} = d_{11}$
$h_{21}$	$\frac{1}{a_{22}}$	$\frac{\Delta b}{b_{11}}$	—	$-\frac{f_{21}}{\Delta f}$	$-\frac{z_{21}}{z_{22}}$	$\frac{y_{21}}{y_{11}}$	$h_{21} = d_{22}$
$h_{22}$	$-\frac{a_{21}}{a_{22}}$	$\frac{b_{21}}{b_{11}}$	—	$\frac{f_{11}}{\Delta f}$	$\frac{1}{z_{22}}$	$\frac{\Delta y}{y_{11}}$	$h_{22} = d_{21}$
$f_{11}$	$\frac{a_{21}}{a_{11}}$	$-\frac{b_{21}}{b_{22}}$	$\frac{h_{22}}{\Delta h}$	—	$\frac{1}{z_{11}}$	$\frac{\Delta y}{y_{22}}$	$f_{11} = g_{11}$
$f_{12}$	$\frac{\Delta a}{a_{11}}$	$\frac{1}{b_{22}}$	$-\frac{h_{12}}{\Delta h}$	—	$-\frac{z_{12}}{z_{11}}$	$\frac{y_{12}}{y_{22}}$	$f_{12} = g_{12}$

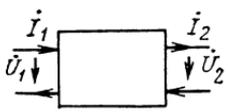
Параметр							Примечание
	$a$	$b$	$h$	$f$	$z$	$y$	
$f_{21}$	$\frac{1}{a_{11}}$	$\frac{\Delta b}{b_{22}}$	$-\frac{h_{21}}{\Delta h}$	—	$\frac{z_{21}}{z_{11}}$	$-\frac{y_{21}}{y_{22}}$	$f_{21} = g_{21}$
$f_{22}$	$-\frac{a_{12}}{a_{11}}$	$\frac{b_{12}}{b_{22}}$	$\frac{h_{11}}{\Delta h}$	—	$\frac{\Delta z}{z_{11}}$	$\frac{1}{y_{22}}$	$f_{22} = g_{22}$
$z_{11}$	$\frac{a_{11}}{a_{21}}$	$-\frac{b_{22}}{b_{21}}$	$\frac{\Delta h}{h_{22}}$	$\frac{1}{f_{11}}$	—	$\frac{y_{22}}{\Delta y}$	
$z_{12}$	$-\frac{\Delta a}{a_{21}}$	$\frac{1}{b_{21}}$	$\frac{h_{12}}{h_{22}}$	$-\frac{f_{12}}{f_{11}}$	—	$-\frac{y_{12}}{\Delta y}$	
$z_{21}$	$\frac{1}{a_{21}}$	$-\frac{\Delta b}{b_{21}}$	$-\frac{h_{21}}{h_{22}}$	$\frac{f_{21}}{f_{11}}$	—	$-\frac{y_{21}}{\Delta y}$	
$z_{22}$	$-\frac{a_{22}}{a_{21}}$	$\frac{b_{11}}{b_{21}}$	$\frac{1}{h_{22}}$	$\frac{\Delta f}{f_{11}}$	—	$\frac{y_{11}}{\Delta y}$	
$y_{11}$	$\frac{a_{22}}{a_{12}}$	$-\frac{b_{11}}{b_{12}}$	$\frac{1}{h_{11}}$	$\frac{\Delta f}{f_{22}}$	$\frac{z_{22}}{\Delta z}$	—	
$y_{12}$	$-\frac{\Delta a}{a_{12}}$	$\frac{1}{b_{12}}$	$-\frac{h_{12}}{h_{11}}$	$\frac{f_{12}}{f_{22}}$	$-\frac{z_{12}}{\Delta z}$	—	
$y_{21}$	$\frac{1}{a_{12}}$	$-\frac{\Delta b}{b_{12}}$	$\frac{h_{21}}{h_{11}}$	$-\frac{f_{21}}{f_{22}}$	$-\frac{z_{21}}{\Delta z}$	—	
$y_{22}$	$-\frac{a_{11}}{a_{12}}$	$\frac{b_{22}}{b_{12}}$	$\frac{\Delta h}{h_{11}}$	$\frac{1}{f_{22}}$	$\frac{z_{11}}{\Delta z}$	—	

Таблица П.2

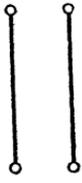
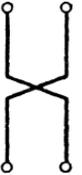
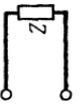
Величина	Система параметров						Примечание
	$a$	$b$	$h$	$f$	$z$	$y$	
$\Delta a$	—	$\frac{1}{\Delta b}$	$\frac{h_{12}}{h_{21}}$	$\frac{f_{12}}{f_{21}}$	$-\frac{z_{12}}{z_{21}}$	$-\frac{y_{12}}{y_{21}}$	
$\Delta b$	$\frac{1}{\Delta a}$	—	$\frac{h_{21}}{h_{12}}$	$\frac{f_{21}}{f_{11}}$	$-\frac{z_{21}}{z_{12}}$	$-\frac{y_{21}}{y_{12}}$	
$\Delta h$	$\frac{a_{11}}{a_{22}}$	$\frac{b_{22}}{b_{11}}$	—	$-\frac{1}{\Delta f}$	$-\frac{z_{11}}{z_{22}}$	$-\frac{y_{22}}{y_{11}}$	$\Delta h =$ $= -\Delta d$
$\Delta f$	$-\frac{a_{22}}{a_{11}}$	$-\frac{b_{11}}{b_{22}}$	$\frac{1}{\Delta h}$	—	$\frac{z_{12}}{z_{11}}$	$-\frac{y_{11}}{y_{22}}$	
$\Delta z$	$-\frac{a_{12}}{a_{21}}$	$-\frac{b_{12}}{b_{21}}$	$\frac{h_{11}}{h_{22}}$	$\frac{f_{22}}{f_{11}}$	—	$\frac{1}{\Delta y}$	
$\Delta y$	$-\frac{a_{21}}{a_{12}}$	$-\frac{b_{21}}{b_{12}}$	$\frac{h_{22}}{h_{11}}$	$\frac{f_{11}}{f_{22}}$	$\frac{1}{\Delta z}$	—	
$H_a$	—	$\frac{1}{\Delta b} H_b$	$\frac{1}{h_{21}} H_h$	$\frac{1}{f_{21}} H_f$	$\frac{1}{z_{21}} H_z$	$\frac{1}{y_{21}} H_y$	
$H_b$	$\frac{1}{\Delta a} H_a$	—	$\frac{1}{h_{12}} H_h$	$\frac{1}{f_{12}} H_f$	$\frac{1}{z_{12}} H_z$	$-\frac{1}{y_{12}} H_y$	
$H_h$	$\frac{1}{a_{22}} H_a$	$\frac{1}{b_{11}} H_b$	—	$-\frac{1}{\Delta f} H_f$	$\frac{1}{z_{22}} H_z$	$\frac{1}{y_{11}} H_y$	$H_h =$ $= H_d$
$H_f$	$\frac{1}{a_{11}} H_a$	$\frac{1}{b_{22}} H_b$	$-\frac{1}{\Delta h} H_h$	—	$\frac{1}{z_{11}} H_z$	$-\frac{1}{y_{22}} H_y$	
$H_z$	$\frac{1}{a_{21}} H_a$	$-\frac{1}{b_{21}} H_b$	$-\frac{1}{h_{22}} H_h$	$\frac{1}{f_{11}} H_f$	—	$-\frac{1}{\Delta y} H_y$	
$H_y$	$\frac{1}{a_{12}} H_a$	$-\frac{1}{b_{12}} H_b$	$\frac{1}{h_{11}} H_h$	$-\frac{1}{f_{22}} H_f$	$-\frac{1}{\Delta z} H_z$	—	

$$H_a = a_{22}Z_1 + a_{11}Z_2 + a_{21}Z_1Z_2 + a_{12}, \quad H_f = -\Delta fZ_1 + Z_2 + f_{11}Z_1Z_2 - f_{22},$$

$$H_b = b_{11}Z_1 + b_{22}Z_2 - b_{21}Z_1Z_2 - b_{12}, \quad H_z = -z_{22}Z_1 + z_{11}Z_2 + Z_1Z_2 - \Delta z,$$

$$H_h = Z_1 - \Delta hZ_2 - h_{22}Z_1Z_2 + h_{11}, \quad H_y = y_{11}Z_1 - y_{22}Z_2 - \Delta yZ_1Z_2 + 1.$$

Таблица П.3

Реализация матрицы для схем					
Матрица					
$[a]$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	—	—	—
$[b]$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	—	—	—
$[h]$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} z & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	—
$[f]$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} z & 0 \\ 0 & -z \end{bmatrix}$
$[z]$	—	—	—	—	—
$[y]$	—	—	$\begin{bmatrix} 1/z & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & z \\ 0 & -z \end{bmatrix}$

Реализация матрицы для схем

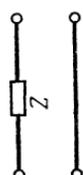
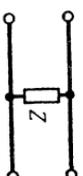
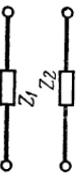
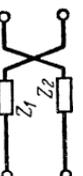
Матрица				
[a]	$\begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & Z_1+Z_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -(Z_1+Z_2) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
[b]	$\begin{bmatrix} 1 & -Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{Z} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -(Z_1+Z_2) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & Z_1+Z_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
[h]	$\begin{bmatrix} Z & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -\frac{1}{Z} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Z_1+Z_2 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Z_1+Z_2 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$
[f]	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -Z \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z} & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -(Z_1+Z_2) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & -(Z_1+Z_2) \end{bmatrix}$
[z]	—	$\begin{bmatrix} Z & -Z \\ Z & -Z \end{bmatrix}$	—	—
[y]	$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z} & -\frac{1}{Z} \\ 1 & -Z \end{bmatrix}$	—	$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1+Z_2} & -\frac{1}{Z_1+Z_2} \\ 1 & -\frac{1}{Z_1+Z_2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_1+Z_2} & -\frac{1}{Z_1+Z_2} \\ 1 & -\frac{1}{Z_1+Z_2} \end{bmatrix}$

Таблица П.5

Реализация матрицы для схем

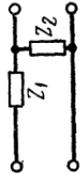
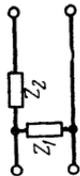
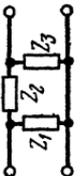
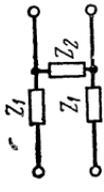
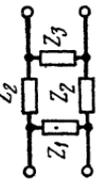
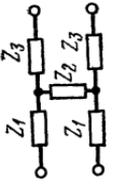
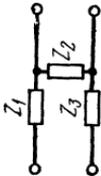
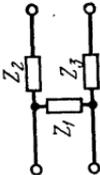
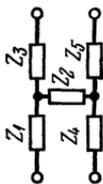
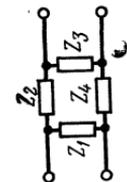
Матрица				
[a]	$\begin{bmatrix} 1+Z_1Y_2 & Z_1 \\ Y_2 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & Z_2 \\ Y_1 & 1+Y_1Z_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1+Z_1Y_2 & Z_1+Z_3+Z_1Y_2Z_3 \\ Y_2 & 1+Y_2Z_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1+Z_3Y_3 & Z_3 \\ Y_1+Y_3+Y_1Z_3Y_3 & 1+Y_1Z_3 \end{bmatrix}$
[b]	$\begin{bmatrix} 1 & -Z_1 \\ -Y_2 & 1+Z_1Y_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1+Y_1Z_2 & -Z_2 \\ -Y_1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1+Y_2Z_3 & -(Z_1+Z_3+Z_1Y_2Z_3) \\ -Y_2 & 1+Z_1Y_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1+Y_1Z_3 & -Z_2 \\ -(Y_1+Y_3+Y_1Z_3Y_3) & 1+Z_3Y_3 \end{bmatrix}$
[h]	$\begin{bmatrix} Z_1 & 1 \\ 1 & -Y_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Z_1 & 1 \\ Z_1+Z_2 & 1-Y_1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & Z_1(Y_1+Y_2+Y_3) & Y_3 \\ Y_2+Y_3 & Y_3 & -Y_3Y_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & Z_1Z_2 & Z_1 \\ Z_1+Z_2 & Z_1 & -Y_3(Z_1+Z_2+Z_3) \end{bmatrix}$
[f]	$\begin{bmatrix} Z_2 & Y_2 & 1 \\ Z_1+Z_2 & 1 & -Z_1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 & 1 \\ 1 & -Z_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & Y_1Y_2 & Y_1 \\ Y_1+Y_2 & Y_1 & -Z_3(Y_1+Y_2+Y_3) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & Y_1(Z_1+Z_2+Z_3) & Z_3 \\ Z_2+Z_3 & Z_3 & -Z_3Z_3 \end{bmatrix}$
[z]	$\begin{bmatrix} Z_1+Z_2 & -Z_2 \\ Z_2 & -Z_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Z_1 & -Z_1 \\ Z_1 & -(Z_1+Z_2) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Z_1+Z_2 & -Z_2 \\ Z_2 & -(Z_2+Z_3) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & Z_1(Z_2+Z_3) & -Z_1Z_3 \\ Z_1+Z_2+Z_3 & Z_3 & -Z_3(Z_1+Z_2) \end{bmatrix}$
[g]	$\begin{bmatrix} Y_1 & -Y_1 \\ Y_1 & -(Y_1+Y_3) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1+Y_2 & -Y_2 \\ Y_3 & -Y_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & Y_1(Y_2+Y_3) & -Y_1Y_3 \\ Y_1+Y_2+Y_3 & Y_1Y_3 & -Y_3(Y_1+Y_2) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1+Y_2 & -Y_2 \\ Y_3 & -(Y_3+Y_3) \end{bmatrix}$

Таблица П.6

Реализация матрицы для схем			
Матрица			
[a]	$\begin{bmatrix} 1+2Z_1Y_2 & 2Z_1 \\ Y_2 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1+2Z_2Y_3 & 2Z_2 \\ Y_1+Y_3+2Y_1Z_2Y_3 & 1+2Y_1Z_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1+2Z_1Y_2 & 2(Z_1+Z_3+2Z_1Y_2Z_3) \\ Y_2 & 1+2Y_2Z_3 \end{bmatrix}$
[b]	$\begin{bmatrix} 1 & -2Z_1 \\ -Y_3 & 1+2Z_1Y_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1+2Y_1Z_2 & -2Z_2 \\ -(Y_1+Y_3+2Y_1Z_2Y_3) & 1+2Z_2Y_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1+2Y_2Z_3 & -2(Z_1+Z_3+2Z_1Y_2Z_3) \\ -Y_2 & 1+2Z_1Y_3 \end{bmatrix}$
[h]	$\begin{bmatrix} 2Z_1 & 1 \\ 1 & -Y_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Z_1 & 1 \\ Z_1+2Z_2 & 1-Y_1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2Z_2 & 1 \\ 1 & -2Z_1Z_2 \end{bmatrix}$
[f]	$\begin{bmatrix} Z_2 & Y_2 \\ 2Z_1+Z_2 & 1-2Z_1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_1 & 1 \\ 1 & -2Z_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & Y_2 \\ 1+2Z_1Y_2 & 1-2(Z_1+Z_3+2Z_1Y_2Z_3) \end{bmatrix}$
[z]	$\begin{bmatrix} 2Z_1+Z_2 & -Z_2 \\ Z_2 & -Z_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Z_1 & -Z_1 \\ Z_1 & -(Z_1+2Z_2) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2Z_1+Z_2 & -Z_2 \\ Z_2 & -(Z_2+2Z_3) \end{bmatrix}$
[y]	$\frac{1}{2Z_1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -Y_2(2Z_1+Z_3) \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2Z_2} \begin{bmatrix} 1 & Y_1(Z_1+2Z_2) \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2(Z_1+Z_3+2Z_1Y_2Z_3)} \begin{bmatrix} 2Y_2Z_3+1 & -1 \\ 1 & 2Z_1Y_2+1 \end{bmatrix}$

Реализации матрицы для схем	
Матрица	
$[a]$	
$[b]$	$\begin{bmatrix} 1+(Z_1+Z_3)Y_2 & Z_1+Z_3 \\ Y_2 & 1 \end{bmatrix}$
$[b]$	$\begin{bmatrix} 1 & -(Z_1+Z_3) \\ -Y_2 & 1+(Z_1+Z_3)Y_2 \end{bmatrix}$
$[b]$	$\begin{bmatrix} Z_1+Z_3 & 1 \\ 1 & -Y_3 \end{bmatrix}$
$[f]$	$\frac{Z_2}{Z_1+Z_2+Z_3} \begin{bmatrix} Y_2 & 1 \\ 1 & -(Z_1+Z_3) \end{bmatrix}$
$[z]$	$\begin{bmatrix} Z_1+Z_2+Z_3 & -Z_3 \\ Z_2 & -Z_2 \end{bmatrix}$
$[y]$	$\frac{1}{Z_1+Z_3} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ Z_1+Z_3 & -Y_2(Z_1+Z_2+Z_3) \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} 1 & Z_2+Z_3 \\ Y_1 & 1+Y_1(Z_2+Z_3) \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} 1+Y_1(Z_2+Z_3) & -(Z_2+Z_3) \\ -Y_1 & 1 \end{bmatrix}$
	$\frac{Z_1}{Z_1+Z_2+Z_3} \begin{bmatrix} Z_2+Z_3 & 1 \\ 1 & -Y_1 \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} Y_1 & 1 \\ 1 & -(Z_2+Z_3) \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} Z_1 & -Z_1 \\ Z_1 & -(Z_1+Z_2+Z_3) \end{bmatrix}$
	$\frac{1}{Z_2+Z_3} \begin{bmatrix} Y_1(Z_1+Z_2+Z_3) & -1 \\ Z_2+Z_3 & 1 \end{bmatrix}$

Реализация матрицы для схем



[a]	$\begin{bmatrix} 1+(Z_2+Z_4)Y_3 & Z_2+Z_4 \\ Y_1+Y_3+Y_1(Z_2+Z_4)Y_3 & 1+Y_1(Z_2+Z_4) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_2(Z_1+Z_4)+1 & Z_1+Z_3+Z_4+Z_5+Y_2(Z_1+Z_4)(Z_3+Z_5) \\ Y_2 & Y_2(Z_3+Z_5)+1 \end{bmatrix}$
[b]	$\begin{bmatrix} 1+Y_1(Z_2+Z_4) & -(Z_2+Z_4) \\ -[Y_1+Y_3+Y_1(Z_2+Z_4)Y_3] & 1+(Z_2+Z_4)Y_3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_2(Z_3+Z_5)+1 & -[Z_1+Z_3+Z_4+Z_5+Y_2(Z_1+Z_4)(Z_3+Z_5)] \\ -Y_2 & Y_2(Z_1+Z_4)+1 \end{bmatrix}$
[h]	$\frac{1}{1+Y_1(Z_2+Z_4)} \begin{bmatrix} Z_2+Z_4 & 1 \\ 1 & -[Y_1+Y_3+Y_1(Z_2+Z_4)Y_3] \end{bmatrix}$	$\frac{1}{Y_2(Z_3+Z_5)+1} \begin{bmatrix} [Z_1+Z_3+Z_4+Z_5+Y_2(Z_1+Z_4)(Z_3+Z_5)] & 1 \\ 1 & -Y_2 \end{bmatrix}$
[f]	$\frac{1}{1+(Z_2+Z_4)Y_3} \begin{bmatrix} Y_1+Y_3+Y_1(Z_2+Z_4)Y_3 & 1 \\ 1 & -(Z_2+Z_4) \end{bmatrix}$	$\frac{1}{Y_2(Z_1+Z_4)+1} \begin{bmatrix} Y_2 & 1 \\ -[Z_1+Z_3+Z_4+Z_5+Y_2(Z_1+Z_4)(Z_3+Z_5)] & 1 \end{bmatrix}$
[z]	$\frac{1}{Y_1+Y_3+Y_1(Z_2+Z_4)Y_3} \begin{bmatrix} 1+(Z_2+Z_4)Y_3 & -1 \\ 1 & -[1+Y_1(Z_2+Z_4)] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Z_1+Z_2+Z_4 & -Z_2 \\ Z_2 & -(Z_2+Z_3+Z_5) \end{bmatrix}$
[y]	$\frac{1}{Z_2+Z_4} \begin{bmatrix} 1+Y_1(Z_2+Z_4) & -1 \\ 1 & -[1+(Z_2+Z_4)Y_3] \end{bmatrix}$	$\frac{1}{Z_1+Z_3+Z_4+Z_5+Y_2(Z_1+Z_4)(Z_3+Z_5)} \begin{bmatrix} 1 & [Y_3(Z_3+Z_5)+1] \\ Y_2(Z_1+Z_4)+1 & Y_2(Z_1+Z_4)+1 \end{bmatrix}$

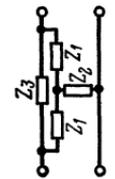
Таблица П.8

Реализация матрицы для схем	
Мат- рица	
[a]	$\frac{1}{Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3} \times$ $\begin{bmatrix} (Z_1 + Z_4) (Z_2 + Z_3) & Z_1 Z_4 (Z_2 + Z_3) + Z_2 Z_3 (Z_1 + Z_4) \\ Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 & (Z_1 + Z_2) (Z_3 + Z_4) \end{bmatrix}$
[b]	$\frac{1}{Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3} \times$ $\begin{bmatrix} (Z_1 + Z_2) (Z_3 + Z_4) & - [Z_1 Z_4 (Z_2 + Z_3) + Z_2 Z_3 (Z_1 + Z_4)] \\ - (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) & (Z_1 + Z_4) (Z_2 + Z_3) \end{bmatrix}$
[h]	$\frac{1}{(Z_1 + Z_2) (Z_3 + Z_4)} \times$ $\begin{bmatrix} Z_1 Z_4 (Z_2 + Z_3) + Z_2 Z_3 (Z_1 + Z_4) & Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3 \\ Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3 & - (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) \end{bmatrix}$
	$\frac{1}{Z_1 Z_3 + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4)} \times$ $\begin{bmatrix} Z_1 (Z_3 + Z_4) + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4) & Z_4 (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3) \\ Z_1 + Z_2 + Z_3 & Z_3 (Z_1 + Z_4) + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4) \end{bmatrix}$
	$\frac{1}{Z_1 Z_3 + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4)} \times$ $\begin{bmatrix} Z_3 (Z_1 + Z_4) + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4) & - Z_4 (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3) \\ - (Z_1 + Z_3 + Z_4) & Z_1 (Z_3 + Z_4) + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4) \end{bmatrix}$
	$\frac{1}{Z_3 (Z_1 + Z_4) + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4)} \times$ $\begin{bmatrix} Z_4 (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3) & Z_1 Z_3 + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4) \\ Z_1 Z_3 + Z_2 (Z_1 + Z_3 + Z_4) & - (Z_1 + Z_3 + Z_4) \end{bmatrix}$

Реализация матрицы для схем	
$[f]$	$\begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 & Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3 \\ Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3 & Z_1 Z_4 (Z_2 + Z_3) + Z_2 Z_3 (Z_1 + Z_4) \end{bmatrix} \times \frac{1}{(Z_1 + Z_4)(Z_2 + Z_3)} \times \begin{bmatrix} Z_1 Z_3 + Z_4 & Z_1(Z_3 + Z_4) + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4) \\ Z_1 Z_3 + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4) & Z_1 Z_3 + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4) \end{bmatrix} \times \frac{1}{Z_1(Z_3 + Z_4) + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4)}$
$[z]$	$\begin{bmatrix} (Z_1 + Z_4)(Z_2 + Z_3) & -(Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3) \\ Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3 & -(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4) \end{bmatrix} \times \frac{1}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} \times \begin{bmatrix} Z_1(Z_3 + Z_4) + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4) & -(Z_1 Z_3 + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4)) \\ Z_1 Z_3 + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4) & -[Z_3(Z_1 + Z_4) + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4)] \end{bmatrix} \times \frac{1}{Z_1 + Z_3 + Z_4}$
$[y]$	$\begin{bmatrix} (Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4) & -(Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3) \\ Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3 & -(Z_1 + Z_4)(Z_3 + Z_4) \end{bmatrix} \times \frac{1}{Z_1 Z_4 (Z_2 + Z_3) + Z_2 Z_3 (Z_1 + Z_4)} \times \begin{bmatrix} Z_3(Z_1 + Z_4) + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4) & -[Z_1 Z_3 + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4)] \\ Z_1 Z_3 + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4) & -[Z_1(Z_3 + Z_4) + Z_2(Z_1 + Z_3 + Z_4)] \end{bmatrix} \times \frac{1}{Z_4(Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3)}$

Таблица П.9

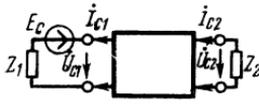
Реализация матрицы для схем

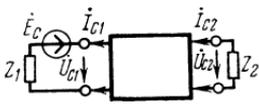


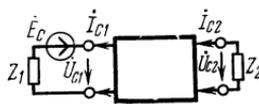
[a]	$\frac{1}{Z_2 - Z_1} \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 & 2Z_1 Z_2 \\ 2 & Z_1 + Z_2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{Z_1^2 + Z_2(2Z_1 + Z_3)} \begin{bmatrix} Z_1(Z_1 + Z_3) + Z_3(2Z_1 + Z_3) & Z_1 Z_3(Z_1 + 2Z_2) \\ 2Z_1 + Z_3 & Z_1(Z_1 + Z_3) + Z_2(2Z_1 + Z_3) \end{bmatrix}$
[b]	$\frac{1}{Z_2 - Z_1} \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 & -2Z_1 Z_2 \\ -2 & Z_1 + Z_2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{Z_1^2 + Z_2(2Z_1 + Z_3)} \begin{bmatrix} Z_1(Z_1 + Z_3) + Z_3(2Z_1 + Z_3) & -Z_1 Z_3(Z_1 + 2Z_2) \\ -(2Z_1 + Z_3) & Z_1(Z_1 + Z_3) + Z_2(2Z_1 + Z_3) \end{bmatrix}$
[г]	$\frac{1}{Z_1 + Z_2} \begin{bmatrix} 2Z_1 Z_2 & Z_2 - Z_1 \\ Z_2 - Z_1 & -2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{Z_1(Z_1 + Z_2) + Z_2(2Z_1 + Z_3)} \begin{bmatrix} Z_1 Z_3(Z_1 + 2Z_2) & Z_1^2 + Z_2(2Z_1 + Z_3) \\ Z_1^2 + Z_2(2Z_1 + Z_3) & -(2Z_1 + Z_3) \end{bmatrix}$
[д]	$\frac{1}{Z_1 + Z_2} \begin{bmatrix} 2 & Z_2 - Z_1 \\ Z_2 - Z_1 & -2Z_1 Z_2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{Z_1(Z_1 + Z_2) + Z_2(2Z_1 + Z_3)} \begin{bmatrix} 2Z_1 + Z_3 & Z_1^2 + Z_2(2Z_1 + Z_3) \\ Z_1^2 + Z_2(2Z_1 + Z_3) & -Z_1 Z_3(Z_1 + 2Z_2) \end{bmatrix}$
[з]	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 & Z_1 - Z_2 \\ Z_2 - Z_1 & -(Z_1 + Z_2) \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2Z_1 + Z_3} \begin{bmatrix} Z_1(Z_1 + Z_3) + Z_2(2Z_1 + Z_3) & -[Z_1^2 + Z_2(2Z_1 + Z_3)] \\ Z_1^2 + Z_2(2Z_1 + Z_3) & -[Z_1(Z_1 + Z_3) + Z_2(2Z_1 + Z_3)] \end{bmatrix}$
[и]	$\frac{1}{2Z_1 Z_2} \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 & Z_1 - Z_2 \\ Z_2 - Z_1 & -(Z_1 + Z_2) \end{bmatrix}$	$\frac{1}{Z_1 Z_3(Z_1 + 2Z_2)} \begin{bmatrix} Z_1(Z_1 + Z_3) + Z_3(2Z_1 + Z_3) & -[Z_1^2 + Z_2(2Z_1 + Z_3)] \\ Z_1^2 + Z_2(2Z_1 + Z_3) & -[Z_1(Z_1 + Z_3) + Z_2(2Z_1 + Z_3)] \end{bmatrix}$

Реализация матрицы для схем	
Матрица	
[a]	$\pm \frac{1}{Z_m} \begin{bmatrix} Z_1 & Z_1 Z_2 - Z_m^2 \\ Z_2 & 1 \end{bmatrix}$
[b]	$\pm \frac{1}{Z_m} \begin{bmatrix} Z_3 & -(Z_1 Z_3 - Z_m^2) \\ -1 & Z_1 \end{bmatrix}$
[h]	$\frac{1}{Z_2} \begin{bmatrix} Z_1 Z_2 - Z_m^2 & \pm Z_m \\ \pm Z_m & -1 \end{bmatrix}$
[f]	$\frac{1}{Z_1} \begin{bmatrix} 1 & \pm Z_m \\ \pm Z_m & -(Z_1 Z_3 - Z_m^2) \end{bmatrix}$
[z]	$\begin{bmatrix} Z_1 & \pm Z_m \\ \pm Z_m & -Z_3 \end{bmatrix}$
[y]	$\frac{1}{Z_1 Z_2 - Z_m^2} \begin{bmatrix} Z_2 & \pm Z_m \\ \pm Z_m & -Z_3 \end{bmatrix}$

Таблица П.10

№ формулы		
1a	$\dot{U}_{c1} = \frac{1}{H_a} (a_{11}Z_2 + a_{12}) \dot{E}_c$	$i_{c1} = \frac{1}{H_a} (a_{21}Z_2 + a_{22}) \dot{E}_c$
1b	$= \frac{1}{H_b} (b_{22}Z_2 - b_{12}) \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_b} (-b_{21}Z_2 + b_{11}) \dot{E}_c$
1h	$= \frac{1}{H_h} (-\Delta h Z_2 + h_{11}) \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_h} (-h_{22}Z_2 + 1) \dot{E}_c$
1f	$= \frac{1}{H_f} (Z_2 - f_{22}) \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_f} (f_{11}Z_2 - \Delta f) \dot{E}_c$
1z	$= \frac{1}{H_z} (z_{11}Z_2 - \Delta z) \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_z} (Z_2 - z_{22}) \dot{E}_c$
1y	$= \frac{1}{H_y} (-y_{22}Z_2 + 1) \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_y} (-\Delta y Z_2 + y_{11}) \dot{E}_c$
2a	$\dot{U}_{c2} = \frac{1}{H_a} Z_2 \dot{E}_c$	$i_{c2} = \frac{1}{H_a} \dot{E}_c$
2b	$= \frac{1}{H_b} \Delta b Z_2 \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_b} \Delta b \dot{E}_c$
2h	$= \frac{1}{H_h} h_{21} Z_2 \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_h} h_{21} \dot{E}_c$
2f	$= \frac{1}{H_f} f_{21} Z_2 \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_f} f_{21} \dot{E}_c$
2z	$= \frac{1}{H_z} z_{21} Z_2 \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_z} z_{21} \dot{E}_c$
2y	$= \frac{1}{H_y} y_{21} Z_2 \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_y} y_{21} \dot{E}_c$

№ формулы		
3a	$\frac{\dot{U}_{c2}}{\dot{U}_{c1}} = \frac{Z_2}{a_{11}Z_2 + a_{12}}$	$\frac{i_{c2}}{i_{c1}} = \frac{1}{a_{21}Z_2 + a_{22}}$
3b	$= \frac{\Delta b Z_2}{b_{22}Z_2 - b_{12}}$	$= \frac{\Delta b}{-b_{21}Z_2 + b_{11}}$
3h	$= \frac{h_{21}Z_2}{-\Delta h Z_2 + h_{11}}$	$= \frac{h_{21}}{-h_{22}Z_2 + 1}$
3f	$= \frac{f_{21}Z_2}{Z_2 - f_{23}}$	$= \frac{f_{21}}{f_{11}Z_2 - \Delta f}$
3z	$= \frac{z_{21}Z_2}{z_{11}Z_2 \Delta z}$	$= \frac{z_{21}}{Z_2 - z_{22}}$
3y	$= \frac{y_{21}Z_2}{-y_{22}Z_2 + 1}$	$= \frac{y_{21}}{-\Delta y Z_2 + y_{11}}$
4a	$\left( \frac{\dot{U}_{c2}}{\dot{U}_{c1}} \right)_{Z_2=\infty} = \frac{1}{a_{11}}$	$\left( \frac{i_{c2}}{i_{c1}} \right)_{Z_2=0} = \frac{1}{a_{22}}$
4b	$= \frac{\Delta b}{b_{22}}$	$= \frac{\Delta b}{b_{11}}$
4h	$= -\frac{h_{21}}{\Delta h}$	$= h_{21}$
4f	$= f_{21}$	$= -\frac{f_{21}}{\Delta f}$
4z	$= \frac{z_{21}}{z_{11}}$	$= -\frac{z_{21}}{z_{22}}$
4y	$= -\frac{y_{21}}{y_{22}}$	$= \frac{y_{21}}{y_{11}}$

№ формулы		
5a	$\frac{\dot{U}_{c1}}{\dot{i}_{c1}} = \frac{a_{11}Z_2 + a_{12}}{a_{21}Z_2 + a_{22}}$	$\frac{\dot{U}_{c2}}{\dot{i}_{c2}} = Z_2$
5b	$= \frac{b_{22}Z_2 - b_{12}}{-b_{21}Z_2 + b_{11}}$	$= Z_2$
5h	$= \frac{\Delta h Z_2 - h_{11}}{h_{22}Z_2 - 1}$	$= Z_2$
5f	$= \frac{Z_2 - f_{22}}{f_{11}Z_2 - \Delta f}$	$= Z_2$
5z	$= \frac{z_{11}Z_2 - \Delta z}{Z_2 - z_{22}}$	$= Z_2$
5y	$= \frac{y_{22}Z_2 - 1}{\Delta y Z_2 - y_{11}}$	$= Z_2$
6a	$\left( \frac{\dot{U}_{c1}}{\dot{i}_{c1}} \right)_{Z_2=\infty} = \frac{a_{11}}{a_{21}}$	$\left( \frac{\dot{U}_{c1}}{\dot{i}_{c1}} \right)_{Z_2=0} = \frac{a_{12}}{a_{22}}$
6b	$= -\frac{b_{22}}{b_{21}}$	$= -\frac{b_{12}}{b_{11}}$
6h	$= -\frac{\Delta h}{h_{22}}$	$= h_{11}$
6f	$= \frac{1}{f_{11}}$	$= \frac{f_{22}}{\Delta f}$
6z	$= z_{11}$	$= \frac{\Delta z}{z_{22}}$
6y	$= \frac{y_{22}}{\Delta y}$	$= \frac{1}{y_{11}}$

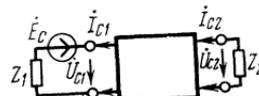
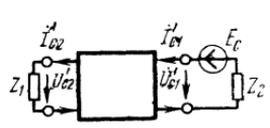
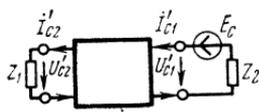
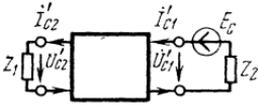
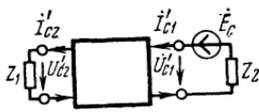
№ формулы		
7a	$\frac{\dot{U}_{c2}}{\dot{i}_{c1}} = \frac{Z_2}{a_{21}Z_2 + a_{22}}$	$\frac{\dot{i}_{c2}}{\dot{U}_{c1}} = \frac{1}{a_{11}Z_2 + a_{12}}$
7b	$= \frac{\Delta b Z_2}{-b_{21}Z_2 + b_{11}}$	$= \frac{\Delta b}{b_{22}Z_2 - b_{12}}$
7h	$= \frac{h_{21}Z_2}{-h_{22}Z_2 + 1}$	$= \frac{h_{21}}{-\Delta h Z_2 + h_{11}}$
7f	$= \frac{f_{21}Z_2}{f_{11}Z_2 - \Delta f}$	$= \frac{f_{21}}{Z_2 - f_{22}}$
7z	$= \frac{z_{21}Z_2}{Z_2 - z_{22}}$	$= \frac{z_{21}}{z_{11}Z_2 - \Delta z}$
7y	$= \frac{y_{21}Z_2}{-\Delta y Z_2 + y_{11}}$	$= \frac{y_{21}}{-y_{22}Z_2 + 1}$
8a	$\left(\frac{\dot{U}_{c2}}{\dot{i}_{c1}}\right)_{Z_2=\infty} = \frac{1}{a_{21}}$	$\left(\frac{\dot{i}_{c2}}{\dot{U}_{c1}}\right)_{Z_2=0} = \frac{1}{a_{12}}$
8b	$= -\frac{\Delta b}{b_{21}}$	$= -\frac{\Delta b}{b_{12}}$
8h	$= -\frac{h_{21}}{h_{22}}$	$= \frac{h_{21}}{h_{11}}$
8f	$= \frac{f_{21}}{f_{11}}$	$= -\frac{f_{21}}{f_{22}}$
8z	$= z_{21}$	$= -\frac{z_{21}}{\Delta z}$
8y	$= -\frac{y_{21}}{\Delta y}$	$= y_{21}$

Таблица П.11

№ формулы		
1a	$\dot{U}'_{c1} = \frac{1}{H_a} (a_{22}Z_1 + a_{12}) \dot{E}_c$	$i'_{c1} = \frac{1}{H_a} (a_{21}Z_1 + a_{11}) \dot{E}_c$
1b	$= \frac{1}{H_b} (b_{11}Z_1 - b_{12}) \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_b} (-b_{21}Z_1 + b_{22}) \dot{E}_c$
1h	$= \frac{1}{H_h} (Z_1 + h_{11}) \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_h} (-h_{22}Z_1 - \Delta h) \dot{E}_c$
1f	$= \frac{1}{H_f} (-\Delta f Z_1 - f_{22}) \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_f} (f_{11}Z_1 + 1) \dot{E}_c$
1z	$= \frac{1}{H_z} (-z_{22}Z_1 - \Delta z) \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_z} (Z_1 + z_{11}) \dot{E}_c$
1y	$= \frac{1}{H_y} (y_{11}Z_1 + 1) \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_y} (-\Delta y Z_1 - y_{22}) \dot{E}_c$
2a	$\dot{U}'_{c2} = \frac{1}{H_a} \Delta a Z_1 \dot{E}_c$	$i'_{c2} = \frac{1}{H_a} \Delta a \dot{E}_c$
2b	$= \frac{1}{H_b} Z_1 \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_b} \dot{E}_c$
2h	$= \frac{1}{H_h} h_{12} Z_1 \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_h} h_{12} \dot{E}_c$
2f	$= \frac{1}{H_f} f_{12} Z_1 \dot{E}_c$	$= \frac{1}{H_f} f_{12} \dot{E}_c$
2z	$= -\frac{1}{H_z} z_{12} Z_1 \dot{E}_c$	$= -\frac{1}{H_z} z_{12} \dot{E}_c$
2y	$= -\frac{1}{H_y} y_{12} Z_1 \dot{E}_c$	$= -\frac{1}{H_y} y_{12} \dot{E}_c$

№ формулы		
3a	$\frac{\dot{U}'_{c2}}{\dot{U}'_{c1}} = \frac{\Delta a Z_1}{a_{22} Z_1 + a_{12}}$	$\frac{i'_{c2}}{i'_{c1}} = \frac{\Delta a}{a_{21} Z_1 + a_{11}}$
3b	$= \frac{Z_1}{b_{11} Z_1 - b_{12}}$	$= \frac{1}{-b_{21} Z_1 + b_{22}}$
3h	$= \frac{h_{12} Z_1}{Z_1 + h_{11}}$	$= -\frac{h_{12}}{h_{21} Z_1 + \Delta h}$
3f	$= \frac{f_{12} Z_1}{-\Delta f Z_1 f_{22}}$	$= \frac{f_{12}}{f_{11} Z_1 + 1}$
3z	$= \frac{z_{12} Z_1}{z_{22} Z_1 + \Delta z}$	$= -\frac{z_{12}}{Z_1 + z_{11}}$
3y	$= -\frac{y_{12} Z_1}{y_{11} Z_1 + 1}$	$= \frac{y_{12}}{\Delta y Z_1 + y_{22}}$
4a	$\left( \frac{\dot{U}'_{c2}}{\dot{U}'_{c1}} \right)_{Z_1=\infty} = \frac{\Delta a}{a_{22}}$	$\left( \frac{i'_{c2}}{i'_{c1}} \right)_{Z_1=0} = \frac{\Delta a}{a_{11}}$
4b	$= \frac{1}{b_{11}}$	$= \frac{1}{b_{22}}$
4h	$= h_{12}$	$= \frac{h_{12}}{\Delta h}$
4f	$= -\frac{f_{12}}{\Delta f}$	$= f_{12}$
4z	$= \frac{z_{12}}{z_{22}}$	$= -\frac{z_{12}}{z_{11}}$
4y	$= -\frac{y_{12}}{y_{11}}$	$= \frac{y_{12}}{y_{22}}$

№ формулы		
5a	$\frac{U'_{c1}}{i'_{c1}} = \frac{a_{22}Z_1 + a_{12}}{a_{21}Z_1 + a_{11}}$	$\frac{U'_{c2}}{i'_{c2}} = Z_1$
5b	$= \frac{b_{11}Z_1 - b_{12}}{-b_{21}Z_1 + b_{22}}$	$= Z_1$
5h	$= - \frac{Z_1 + h_{11}}{-h_{22}Z_1 + \Delta h}$	$= Z_1$
5f	$= - \frac{\Delta f Z_1 + f_{22}}{f_{11}Z_1 + 1}$	$= Z_1$
5z	$= - \frac{z_{22}Z_1 + \Delta z}{Z_1 + z_{11}}$	$= Z_1$
5y	$= - \frac{y_{11}Z_1 + 1}{\Delta y Z_1 + y_{22}}$	$= Z_1$
6a	$\left( \frac{U'_{c1}}{i'_{c1}} \right)_{Z_1=\infty} = \frac{a_{22}}{a_{21}}$	$\left( \frac{U'_{c1}}{i'_{c1}} \right)_{Z_1=0} = \frac{a_{12}}{a_{11}}$
6b	$= - \frac{b_{11}}{b_{21}}$	$= - \frac{b_{12}}{b_{22}}$
6h	$= - \frac{1}{h_{22}}$	$= - \frac{h_{11}}{\Delta h}$
6f	$= - \frac{\Delta f}{f_{11}}$	$= - f_{12}$
6z	$= - z_{22}$	$= - \frac{\Delta z}{z_{11}}$
6y	$= - \frac{y_{11}}{\Delta y}$	$= - \frac{1}{y_{22}}$

№ формулы		
7a	$\frac{\dot{U}'_{c2}}{i'_{c1}} = \frac{\Delta a Z_1}{a_{21} Z_1 + a_{11}}$	$\frac{i'_{c2}}{\dot{U}'_{c1}} = \frac{\Delta a}{a_{22} Z_1 + a_{12}}$
7b	$= -\frac{Z_1}{b_{21} Z_1 + b_{22}}$	$= \frac{1}{b_{11} Z_1 - b_{12}}$
7h	$= -\frac{h_{12} Z_1}{h_{22} Z_1 + \Delta h}$	$= \frac{h_{12}}{Z_1 + h_{11}}$
7f	$= \frac{f_{12} Z_1}{f_{11} Z_1 + 1}$	$= -\frac{f_{12}}{\Delta f Z_1 + f_{12}}$
7z	$= -\frac{z_{12} Z_1}{Z_1 + z_{11}}$	$= \frac{z_{12}}{z_{22} Z_1 + \Delta z}$
7y	$= \frac{y_{12} Z_1}{\Delta y Z_1 + y_{22}}$	$= -\frac{y_{12}}{y_{11} Z_1 + 1}$
8a	$\left( \frac{\dot{U}'_{c2}}{i'_{c1}} \right)_{Z_1=\infty} = \frac{\Delta a}{a_{21}}$	$\left( \frac{i'_{c2}}{\dot{U}'_{c1}} \right)_{Z_1=0} = \frac{\Delta a}{a_{12}}$
8b	$= -\frac{1}{b_{21}}$	$= -\frac{1}{b_{12}}$
8h	$= -\frac{h_{12}}{h_{22}}$	$= \frac{h_{12}}{h_{11}}$
8f	$= \frac{f_{12}}{f_{11}}$	$= -\frac{f_{12}}{f_{22}}$
8z	$= -z_{12}$	$= \frac{z_{12}}{\Delta z}$
8y	$= \frac{y_{12}}{\Delta y}$	$= -y_{12}$

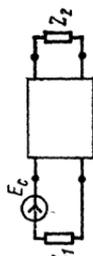
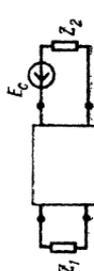
Система параметр						
	$a_{b1}$	$a_{p1}$	$a_{d1}$	$a_{b2}$	$a_{p2}$	$a_{d2}$
«а»	$\ln \left  \frac{H_a}{Z_1 + Z_2} \right $	$\ln \left  \frac{H_a}{2(Z_1 Z_2)^{1/2}} \right $	$\ln \left  \frac{H_a}{2(R_1 R_2)^{1/2}} \right $	$\ln \left  \frac{H_a}{(Z_1 + Z_2) \Delta a} \right $	$\ln \left  \frac{H_a}{2(Z_1 Z_2)^{1/2} \Delta a} \right $	$\ln \left  \frac{H_a}{2(R_1 R_2)^{1/2} \Delta a} \right $
«б»	$\ln \left  \frac{H_b}{(Z_1 + Z_2)  b } \right $	$\ln \left  \frac{H_b}{2(Z_1 Z_2)^{1/2}  b } \right $	$\ln \left  \frac{H_b}{2(R_1 R_2)^{1/2}  b } \right $	$\ln \left  \frac{H_b}{Z_1 + Z_2} \right $	$\ln \left  \frac{H_b}{2(Z_1 Z_2)^{1/2}} \right $	$\ln \left  \frac{H_b}{2(R_1 R_2)^{1/2}} \right $
«в»	$\ln \left  \frac{H_h}{(Z_1 + Z_2) h_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_h}{2(Z_1 Z_2)^{1/2} h_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_h}{2(R_1 R_2)^{1/2} h_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_h}{(Z_1 + Z_2) h_{12}} \right $	$\ln \left  \frac{H_h}{2(Z_1 Z_2)^{1/2} h_{12}} \right $	$\ln \left  \frac{H_h}{2(R_1 R_2)^{1/2} h_{12}} \right $
«г»	$\ln \left  \frac{H_f}{(Z_1 + Z_2) f_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_f}{2(Z_1 Z_2)^{1/2} f_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_f}{2(R_1 R_2)^{1/2} f_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_f}{(Z_1 + Z_2) f_{12}} \right $	$\ln \left  \frac{H_f}{2(Z_1 Z_2)^{1/2} f_{12}} \right $	$\ln \left  \frac{H_f}{2(R_1 R_2)^{1/2} f_{12}} \right $
«з»	$\ln \left  \frac{H_z}{(Z_1 + Z_2) z_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_z}{2(Z_1 Z_2)^{1/2} z_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_z}{2(R_1 R_2)^{1/2} z_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_z}{(Z_1 + Z_2) z_{12}} \right $	$\ln \left  \frac{H_z}{2(Z_1 Z_2)^{1/2} z_{12}} \right $	$\ln \left  \frac{H_z}{2(R_1 R_2)^{1/2} z_{12}} \right $
«у»	$\ln \left  \frac{H_y}{(Z_1 + Z_2) y_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_y}{2(Z_1 Z_2)^{1/2} y_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_y}{2(R_1 R_2)^{1/2} y_{21}} \right $	$\ln \left  \frac{H_y}{(Z_1 + Z_2) y_{12}} \right $	$\ln \left  \frac{H_y}{2(Z_1 Z_2)^{1/2} y_{12}} \right $	$\ln \left  \frac{H_y}{2(R_1 R_2)^{1/2} y_{12}} \right $

Таблица П.13

№ формулы	Наименование величины	Величина	Формулы результирующих сигнальных величин	
			$z^{(1)} \neq \dots \neq z^{(s)} \neq \dots \neq z^{(\mu)}$	$z^{(1)} = \dots = z^{(s)} = \dots = z^{(\mu)}$
1	Входное напряжение	$\dot{U}_{с1}$	$\frac{1}{H_z^{(p)}} (z_{11}^{(p)} Z_2 - \Delta z^{(p)}) \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_{zz}'} (z_{11} Z_2 - \Delta z) \dot{E}_c$
2	Входной ток	$i_c$	$\frac{1}{H_z^{(p)}} (Z_2 - z_{22}^{(p)}) \dot{E}_c$	$\frac{1}{\mu H_{zz}'} (Z_2 - z_{22}) \dot{E}_c$
3	Выходное напряжение	$\dot{U}_{с2}$	$\frac{1}{H_z^{(p)}} z_{21}^{(p)} Z_2 \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_{zz}'} z_{21} Z_2 \dot{E}_c$
4	Выходной ток	$i_{с2}$	$\frac{1}{H_z^{(p)}} z_{01}^{(p)} \dot{E}_c$	$\frac{1}{\mu H_{zz}'} z_{21} \dot{E}_c$
5	Входное сопротивление	$Z_{вх}$	$\frac{z_{11}^{(p)} Z_2 - \Delta z^{(p)}}{Z_2 - z_{22}^{(p)}}$	$\frac{z_{11} Z_2 - \Delta z}{Z_2 - z_{22}}$

№ формулы	Наименование величины	Величина	Формулы результирующих сигнальных величин	
			$z^{(1)} \neq \dots \neq z^{(s)} \neq \dots \neq z^{(p)} \neq \dots \neq z^{(s)}$	$z^{(1)} = \dots = z^{(s)} = \dots = z^{(p)} = \dots = z^{(s)}$
6	Выходное сопротивление	$Z_{\text{Вых}}$	$-\frac{z_{22}^{(p)} Z_1 + \Delta z^{(p)}}{Z_1 + z_{11}^{(p)}}$	$-\mu \frac{z_{22} Z_1 + \Delta z}{Z_1 + z_{11}}$
7	Коэффициент передачи по току	$K_I$	$\frac{z_{21}^{(p)}}{Z_2 - z_{22}^{(p)}}$	$\frac{z_{21}}{Z_2 - z_{22}}$
8	Коэффициент передачи по напряжению	$K_U$	$\frac{z_{21}^{(p)} Z_2}{z_{11}^{(p)} Z_2 - \Delta z^{(p)}}$	$\frac{z_{21} Z_2}{z_{11} Z_2 - \Delta z}$
9	Коэффициент передачи по мощности	$K_P$	$\frac{z_{21}^{(p)2} Z_2}{(Z_2 - z_{22}^{(p)}) (z_{11}^{(p)} Z_2 - \Delta z^{(p)})}$	$\frac{z_{21}^2 Z_2}{(Z_2 - z_{22}) (z_{11} Z_2 - \Delta z)}$

Примечание.  $\Delta z^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} z_{11}^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} z_{22}^{(s)} - \sum_{s=1}^{\mu} z_{12}^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} z_{21}^{(s)}$ ;  $H_z^{(p)} = -z_{22}^{(p)} Z_1 + z_{11}^{(p)} Z_2 + Z_1 Z_2 - \Delta z^{(p)}$ ;  $H_{zz}^{(p)} = -\mu z_{22} Z_1 + \mu z_{11} Z_2 + Z_1 Z_2 - \mu^2 \Delta z$ ;  $H'_{zz} = -z_{22} Z_1 + z_{11} Z_2 + Z_1 Z_2 - \Delta z$ .

Таблица П.14

№ формулы	Наименование величины	Величина	Формулы результирующих сигнальных величин		
			$y^{(1)} \neq \dots \neq y^{(s)} \neq \dots \neq y^{(\mu)}$	$y^{(1)} = \dots = y^{(s)} = \dots = y^{(\mu)}$	$Z'_1 = \mu Z_1, Z'_2 = \mu Z_2$
1	Входное напряжение	$\dot{U}_{c1}$	$\frac{1}{H_y^{(p)}} (-y_{22}^{(p)} Z_2 + 1) \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_{yy}^{(p)}} (-\mu y_{22} Z_2 + 1) \dot{E}_c$	$\frac{1}{H'_{yy}} (-y_{22} Z'_2 + 1) \dot{E}_c$
2	Входной ток	$i_{c1}$	$\frac{1}{H_y^{(p)}} (-\Delta y^{(p)} Z_2 + y_{11}^{(p)}) \dot{E}_c$	$\frac{\mu}{H_{yy}^{(p)}} (-\mu \Delta y Z_2 + y_{11}) \dot{E}_c$	$\frac{\mu}{H'_{yy}} (-\Delta y Z'_2 + y_{11}) \dot{E}_c$
3	Выходное напряжение	$\dot{U}_{c2}$	$\frac{1}{H_y^{(p)}} y_{21}^{(p)} Z_2 \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_{yy}^{(p)}} \mu y_{21} Z_2 \dot{E}_c$	$\frac{1}{H'_{yy}} y_{21} Z'_2 \dot{E}_c$
4	Выходной ток	$i_{c2}$	$\frac{1}{H_y^{(p)}} y_{21}^{(p)} \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_{yy}^{(p)}} \mu y_{21} \dot{E}_c$	$\frac{1}{H'_{yy}} \mu y_{21} \dot{E}_c$
5	Входное сопротивление	$Z_{вх}$	$\frac{y_{22}^{(p)} Z_2 - 1}{\Delta y^{(p)} Z_2 - y_{11}^{(p)}}$	$\frac{\mu y_{22} Z_2 - 1}{\mu (\mu \Delta y Z_2 - y_{11})}$	$\frac{y_{22} Z'_2 - 1}{\mu (\Delta y Z'_2 - y_{11})}$

№ формулы	Наименование величины	Величина	Формулы результирующих сигнальных величин	
			$y^{(1)} \neq \dots \neq y^{(s)} \neq \dots \neq y^{(\mu)}$	$y^{(1)} = \dots = y^{(s)} = \dots = y^{(\mu)}$
6	Выходное сопротивление	$Z_{\text{вых}}$	$-\frac{y_{11}^{(p)} Z_1 + 1}{\Delta y^{(p)} Z_1 + y_{22}^{(p)}}$	$-\frac{y_{11} Z_1 + 1}{\mu (\Delta y Z_1 + y_{22})}$
7	Коэффициент передачи по току	$K_I$	$-\frac{y_{21}^{(p)}}{\Delta y^{(p)} Z_2 + y_{11}^{(p)}}$	$\frac{y_{21}}{-\Delta y Z_2 + y_{22}}$
8	Коэффициент передачи по напряжению	$K_U$	$\frac{y_{21}^{(p)} Z_2}{-\Delta y^{(p)} Z_2 + 1}$	$\frac{y_{21} Z_2'}{-y_{22} Z_2' + 1}$
9	Коэффициент передачи по мощности	$K_P$	$\frac{y_{21}^{(p)} Z_2}{(-\Delta y^{(p)} Z_2 + y_{11}^{(p)}) (-y_{22}^{(p)} Z_2 + 1)}$	$\frac{y_{21}^2 Z_2'}{(-y_{22} Z_2' + 1) (-\Delta y Z_2' + y_{22})}$

Примечание:  $\Delta y^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} y_{11}^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} y_{22}^{(s)} - \sum_{s=1}^{\mu} y_{12}^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} y_{21}^{(s)}$ ;  $H^{(p)} = y_{11}^{(p)} Z_1 - y_{22}^{(p)} Z_2 - \Delta y^{(p)} Z_1 Z_2 + 1$ ;  $H^{(p)} = \mu y_{11} Z_1 - \mu y_{22} Z_2 - \mu^2 \Delta y Z_1 Z_2 + 1$ ;  $H'_{yy} = y_{11} Z_1' - y_{22} Z_2' - \Delta y Z_1' Z_2' + 1$ .

Таблица П.15

№ формулы	Наименование величины	Величина	Формулы результирующих сигнальных величин		
			$h^{(1)} \neq \dots \neq h^{(s)} \neq \dots \neq h^{(\mu)}$	$h^{(1)} = \dots = h^{(s)} = \dots = h^{(\mu)}$	$Z'_1 = Z_1/\mu; Z'_2 = \mu Z_2$
1	Входное напряжение	$U_{c1}$	$\frac{1}{H_h^{(p)}} (-\Delta h^{(p)} Z_2 + h_{11}^{(p)}) \dot{E}_c$	$\frac{\mu}{H_{hh}^{(p)}} (-\mu \Delta h Z_2 + h_{11}) \dot{E}_c$	$\frac{1}{H'_{hh}} (-\Delta h Z'_2 + h_{11}) \dot{E}_c$
2	Входной ток	$i_{c1}$	$\frac{1}{H_h^{(p)}} (-h_{22}^{(p)} Z_2 + 1) \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_{hh}^{(p)}} (-\mu h_{22} Z_2 + 1) \dot{E}_c$	$\frac{1}{\mu H'_{hh}} (-h_{22} Z'_2 + 1) \dot{E}_c$
3	Выходное напряжение	$U_{c2}$	$\frac{1}{H_h^{(p)}} h_{21}^{(p)} Z_2 \dot{E}_c$	$\frac{\mu}{H_{hh}^{(p)}} h_{21} Z_2 \dot{E}_c$	$\frac{1}{\mu H'_{hh}} h_{21} Z'_2 \dot{E}_c$
4	Выходной ток	$i_{c2}$	$\frac{1}{H_h^{(p)}} h_{21}^{(p)} \dot{E}_c$	$\frac{\mu}{H_{hh}^{(p)}} h_{21} \dot{E}_c$	$\frac{1}{H'_{hh}} h_{21} \dot{E}_c$
5	Входное сопротивление	$Z_{вх}$	$\frac{\Delta h^{(p)} Z_2 - h_{11}^{(p)}}{h_{22}^{(p)} Z_2 - 1}$	$\frac{\mu \Delta h Z_2 - h_{11}}{\mu h_{21} Z_2 - 1}$	$\frac{\Delta h Z'_2 - h_{11}}{\mu h_{21} Z'_2 - 1}$

Продолжение табл. П.15

№ формулы	Наименование величины	Формулы результирующих сигнальных величин	
		Величина	
		$h^{(1)} \neq \dots \neq h^{(s)} \neq \dots \neq h^{(\mu)}$	$h^{(1)} = \dots = h^{(s)} = \dots = h^{(\mu)}$
			$Z'_1 = Z_1 / \mu; Z'_2 = \mu Z_2$
6	Выходное соотношение	$-\frac{Z_1 + h_{11}^{(p)}}{-h_{22}^{(p)} Z_1 + \Delta h^{(p)}}$	$-\frac{Z_1 + \mu h_{11}}{\mu (-h_{22} Z_1 + \mu \Delta h)}$
7	Коэффициент передачи по току	$\frac{h_{21}^{(p)}}{-h_{22}^{(p)} Z_2 + 1}$	$\frac{\mu h_{21}}{-\mu h_{22} Z_2 + 1}$
8	Коэффициент передачи по напряжению	$\frac{h_{21}^{(p)} Z_2}{-\Delta h^{(p)} Z_2 + h_{11}^{(p)}}$	$\frac{h_{21} Z_2}{\mu (-\Delta h Z_2 + h_{11})}$
9	Коэффициент передачи по мощности	$\frac{h_{21}^{(p)} Z_2}{(-\Delta h^{(p)} Z_2 + h_{11}^{(p)}) (-h_{22}^{(p)} Z_2 + 1)}$	$\frac{h_{21}^2 Z_2}{\mu h_{21}^2 Z_2 / ((-\mu \Delta h Z_2 + h_{11}) (-\mu h_{22} Z_2 + 1))}$

Примечание:  $\Delta h^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} h_{11}^{(s)} - \sum_{s=1}^{\mu} h_{22}^{(s)} - \sum_{s=1}^{\mu} h_{12}^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} h_{21}^{(s)}$ ;  $H_{hh}^{(p)} = Z_1 - \Delta h^{(p)} Z_2 - h_{22}^{(p)} Z_1 Z_2 + h_{11}$ ;  $H_{hh}^{(p)} = Z_1 - \mu^2 \Delta h Z_2 - \mu h_{22} Z_1 Z_2 + \mu h_{11}$ ;  $H_{hh}^{(p)} = Z_1' - \Delta h Z_2' - h_{22} Z_1' Z_2' + h_{11}$ .

Таблица П.16

№ формулы	Наименование величины	Величина	Формулы результирующих сигнальных величин		
			$f^{(s)} \neq \dots \neq f^{(\mu)}$	$f^{(s)} = \dots = f^{(\mu)}$	$Z'_1 = \mu Z_1; Z'_2 = Z_2 / \mu$
1	Входное напряжение	$\dot{U}_{c1}$	$\frac{1}{H_f^{(p)}} (Z_2 - f_{22}^{(p)}) \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_{ff}^{(p)}} (Z_2 - \mu f_{22}) \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_{ff}} (Z'_2 - f_{22}) \dot{E}_c$
2	Входной ток	$i_{c1}$	$\frac{1}{H_f^{(p)}} (f_{11}^{(p)} Z_2 - \Delta f^{(p)}) \dot{E}_c$	$\frac{\mu}{H_{ff}^{(p)}} (f_{11} Z_2 - \mu \Delta f) \dot{E}_c$	$\frac{\mu}{H'_{ff}} (f_{11} Z'_2 - \Delta f) \dot{E}_c$
3	Выходное напряжение	$\dot{U}_{c2}$	$\frac{1}{H_f^{(p)}} f_{21}^{(p)} Z_2 \dot{E}_c$	$\frac{\mu}{H_{ff}^{(p)}} f_{21} Z_2 \dot{E}_c$	$\frac{\mu}{H'_{ff}} f_{21} Z'_2 \dot{E}_c$
4	Выходной ток	$i_{c2}$	$\frac{1}{H_f^{(p)}} f_{21}^{(p)} \dot{E}_c$	$\frac{\mu}{H_{ff}^{(p)}} f_{21} \dot{E}_c$	$\frac{1}{H'_{ff}} f_{21} \dot{E}_c$
5	Входное сопротивление	$Z_{вх}$	$\frac{Z_2 - f_{22}^{(p)}}{f_{11}^{(p)} Z_2 - \Delta f^{(p)}}$	$\frac{Z_2 - \mu f_{22}}{\mu (f_{11} Z_2 - \mu \Delta f)}$	$\frac{Z'_2 - f_{22}}{\mu (f_{11} Z'_2 - \Delta f)}$

Продолжение табл. П.16

№ формулы	Наименование величин	Формулы результирующих сигнальных величин	
		Величина	Формула
		$f^{(s)} \neq \dots \neq f^{(s)} \neq \dots \neq f^{(\mu)}$	$f^{(s)} = \dots = f^{(s)} = \dots = f^{(\mu)}$
6	Выходное соотношение	$\frac{\Delta f^{(p)} Z_1 + f_{22}^{(p)}}{f_{11}^{(p)} Z_1 + 1}$	$\frac{\mu (\Delta f_{21}' Z_1 + f_{22})}{f_{11} Z_1 + 1}$
7	Коэффициент передачи по току	$\frac{f_{21}^{(p)}}{f_{11}^{(p)} Z_2 - \Delta f^{(p)}}$	$\frac{f_{21}}{\mu (f_{11} Z_2' - \Delta f)}$
8	Коэффициент передачи по напряжению	$\frac{f_{21}^{(p)} Z_2}{Z_2 - f_{22}^{(p)}}$	$\frac{\mu f_{21}' Z_2}{Z_2' - f_{22}}$
9	Коэффициент передачи по мощности	$\frac{f_{21}^{(p)} Z_2}{(f_{11}^{(p)} Z_2 - \Delta f^{(p)}) (Z_2 - f_{22}^{(p)})}$	$\frac{f_{21}' Z_2}{(f_{11} Z_2' - \Delta f) (Z_2' - f_{22})}$

Примечание:  $\Delta f^{(p)} = \sum_{s=1}^{\mu} f_{11} \sum_{s=1}^{\mu} f_{22} - \sum_{s=1}^{\mu} f_{12} \sum_{s=1}^{\mu} f_{21}$ ;  $H_f^{(p)} = -\Delta f^{(p)} Z_1 + Z_2 + f_{11}^{(p)} Z_1 Z_2 - f_{22}^{(p)}$ ;  $H_f^{(p)} = -\mu^2 \Delta f Z_1 + Z_2 + \mu f_{11} Z_1 Z_2 - \mu f_{22}$ ;  $H_f' = \Delta f Z_1' + Z_2' + f_{11}' Z_1' Z_2' - f_{22}'$

Таблица П.17

№ формулы	Наименование величин	Величина	Формулы результирующих сигнальных величин	
			полное соединение	s-й четырехполюсник
1	Входное напряжение	$\dot{U}_{c1}$	$\frac{1}{H_a^{(p)}} (a_{11}^{(p)} Z_2 + a_{12}^{(p)}) \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_a^{(p)}} (a_{11}^{(\mu-s)}(p) Z_2 + a_{12}^{(\mu-s)}(p)) \dot{E}_c$
2	Входной ток	$i_{c1}$	$\frac{1}{H_a^{(p)}} (a_{21}^{(p)} Z_2 + a_{22}^{(p)}) \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_a^{(p)}} (a_{21}^{(\mu-s)}(p) Z_2 + a_{22}^{(\mu-s)}(p)) \dot{E}_c$
3	Выходное напряжение	$\dot{U}_{c2}$	$\frac{1}{H_a^{(p)}} Z_2 \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_a^{(p)}} [a_{11}^{(s)}(p)(-1) (a_{11}^{(p)} Z_2 + a_{12}^{(p)}) + a_{12}^{(s)}(p)(-1) (a_{21}^{(p)} Z_2 + a_{22}^{(p)})] \dot{E}_c$
4	Выходной ток	$i_{c2}$	$\frac{1}{H_a^{(p)}} \dot{E}_c$	$\frac{1}{H_a^{(p)}} [a_{21}^{(s)}(p)(-1) (a_{11}^{(p)} Z_2 + a_{12}^{(p)}) + a_{22}^{(s)}(p)(-1) (a_{21}^{(p)} Z_2 + a_{22}^{(p)})] \dot{E}_c$
5	Входное сопротивление	$Z_{вх}$	$\frac{a_{11}^{(p)} Z_2 + a_{12}^{(p)}}{a_{21}^{(p)} Z_2 + a_{22}^{(p)}}$	$\frac{a_{11}^{(\mu-s)}(p) Z_2 + a_{12}^{(\mu-s)}(p)}{a_{21}^{(\mu-s)}(p) Z_2 + a_{22}^{(\mu-s)}(p)}$

Продолжение табл. П.17

№ формулы	Наименование величины	Величина	Формулы результирующих сигнальных величин	
			полное соединение	s-й четырехполюсник
6	Выходное соотношение	$Z_{\text{вых}}$	$\frac{a_{22}^{(p)} Z_1 + a_{12}^{(p)}}{a_{21}^{(p)} Z_1 + a_{11}^{(p)}}$	$\frac{a_{22}^{(s)(p)} Z_1 + a_{12}^{(s)(p)}}{a_{21}^{(s)(p)} Z_1 + a_{11}^{(s)(p)}}$
7	Коэффициент усиления по току	$K_I$	$\frac{1}{a_{21}^{(p)} Z_2 + a_{22}^{(p)}}$	$\frac{1}{a_{21}^{(\mu-s)(p)} Z_2 + a_{22}^{(\mu-s)(p)}}$
8	Коэффициент усиления по напряжению	$K_U$	$\frac{Z_2}{a_{11}^{(p)} Z_2 + a_{12}^{(p)}}$	$\frac{Z_2}{a_{11}^{(\mu-s)(p)} Z_2 + a_{12}^{(\mu-s)(p)}}$
9	Коэффициент усиления по мощности	$K_P$	$\frac{Z_2}{(a_{11}^{(p)} Z_2 + a_{12}^{(p)}) (a_{21}^{(p)} Z_2 + a_{22}^{(p)})}$	$\frac{Z_2}{(a_{11}^{(\mu-s)(p)} Z_2 + a_{12}^{(\mu-s)(p)}) (a_{21}^{(\mu-s)(p)} Z_2 + a_{22}^{(\mu-s)(p)})}$

Примечание:  $H_a^{(p)} = a_{22}^{(p)} Z_1 + a_{11}^{(p)} Z_2 + a_{21}^{(p)} Z_1 Z_2 + a_{12}^{(p)}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. Г. Проблемы создания микроэлектронной аппаратуры. — «Микроэлектроника», 1967, вып. 1.
2. Алмазов-Долженко К. И. О необходимых условиях высокочастотного согласования при измерении коэффициента шума СВЧ усилителей. — «Электроника», 1962, серия I, вып. 3.
3. Артым А. Д. Усилители с обратной связью. Л., «Энергия», 1969. 248 с.
4. Айнбиндер И. М. Критерий уровня входного шума. — «Радиотехника», 1967, т. 22, № 5.
5. Баев Н. А., Удалов А. Н. Лекции по теории цепей с сосредоточенными параметрами. М., Связьиздат, 1955. 275 с.
6. Белецкий А. Ф. Основы теории линейных электрических цепей. М., «Связь», 1967. 607 с.
7. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. М., ИИЛ, 1948. 641 с.
8. Белоусов А. П. Расчет коэффициента шума радиоприемников. М., Оборонгиз, 1959. 135 с.
9. Борисов А. И. Определение основных параметров многоканальных усилителей на полупроводниковых триодах для кабельных магистралей. — «Электросвязь», 1960, № 2.
10. Бенетт У. Р. Основные понятия и методы теории шумов в радиотехнике. М., «Советское радио», 1957. 103 с.
11. Булгаков Б. В. Колебания. М., Издательство технико-теоретической литературы, 1954. 891 с.
12. Бомштейн Б. Д., Бурда Л. Я., Фарбер Ю. Я. Качественные показатели трактов и каналов высокочастотных систем передачи. М., «Связь», 1972, 208 с.
13. Будинский И. Усилители низкой частоты на транзисторах. М., Связьиздат, 1963. 319 с.
14. Блюмберг Л. М., Нусинов Е. Б. О регулярных соединениях шумящих четырехполосников. — «Электросвязь», 1968, № 9.
15. Бунимович В. И. Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах. М., «Советское радио», 1951. 359 с.
16. Ван-дер-Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках. М., ИИЛ, 1961. 232 с.
17. Ван-дер-Зил А. Флуктуации в радиотехнике и физике. М.-Л., Госэнергоиздат, 1958. 296 с.
18. Гарновский Н. Н. Теоретические основы электропроводной связи. Ч. 1. М., Связьиздат, 1956. 692 с.
19. Гуткин Л. С., Лебедев В. Л., Сифоров В. И. Радиоприемные устройства. Ч. 1. М., «Советское радио», 1961. 703 с.
20. Гольдман С. И. Гармонический анализ, модуляция, шум. М., ИИЛ, 1951. 408 с.

21. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., «Советское радио», 1971. 626 с.
22. Гроднев И. И. Кабели связи. М.-Л., «Энергия», 1965. 279 с.
23. Грановский В. Л. Электрические флуктуации. ОНТИ, 1936. 186 с.
24. Герценштейн М. Е., Соловей Л. Г., Верховых Н. П. Об определении коэффициента шума СВЧ приемника. — «Радиотехника», 1970, т. 25, № 1.
25. Дементьев Е. П. Шумовые параметры транзисторов. — «Вопросы радиоэлектроники», 1967, серия VIII, вып. 1.
26. Джиллеспи А. Б. Сигнал, шум и разрешающая способность усилителя. М., Атомиздат, 1964. 164 с.
27. Дементьев Е. П. Элементы общей теории и расчета шумящих линейных цепей. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. 210 с.
28. Давыдов Г. Б. Основы теории и расчета фазокорректирующих цепей. М., Связьиздат, 1958. 293 с.
29. Дальняя связь. Под ред. А. М. Зингеренко. М., «Связь», 1970.
30. Давенпорт В. Б., Рут В. Л. Введение в теорию случайных сигналов и шумов. Перевод с англ. под ред. Р. Л. Добрушина. М., НИИЛ, 1960. 468 с.
31. Долуханов М. П. Оптимальные методы передачи сигналов по линиям радиосвязи. М., «Связь», 1965. 170 с.
32. Ефимов И. Е. Современная микроэлектроника. М., «Советское радио», 1973.
33. Егоров К. П. Основы многоканальной связи. М., «Связь», 1962. 416 с.
34. Зелях Э. В. Новая теория автономного четырехполюсника и ее применение к усилителю с распределенным усилением. — «Радиотехника», 1960, т. 15, № 8.
35. Зелях Э. В. Основы общей теории линейных электрических схем. Изд. АН СССР, 1951. 335 с.
36. Знаменский А. Е., Теплюк И. Н. Активные RC-фильтры. М., «Связь», 1970. 280 с.
37. Заездный А. М. Основы расчетов радиотехнических цепей. М., «Связь», 1966. 368 с.
38. Копыл Г. Ф., Таругута А. С. Коэффициенты шума регулярных соединений шумящих четырехполюсников с общей стороной. — «Радиотехника», 1968, т. 23, № 3.
39. Колосов А. А. Резонансные системы и резонансные усилители. М., Связьиздат, 1949. 560 с.
40. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.-Л., Госэнергоиздат, 1956. 151 с.
41. Коган С. С. Теория и расчет фильтров для установок дальней связи. М., Связьиздат, 1950. 178 с.
42. Кузьмин А. Д. Измерение коэффициента шума приемно-усилительных устройств. М.-Л., Госэнергоиздат, 1965. 64 с.
43. Крейнгель Н. С. Шумовые параметры радиоприемных устройств. Л., «Энергия», 1969. 168 с.
44. Колачевский Н. И. Магнитные шумы. М., «Наука», 1971. 136 с.
45. Косминский О. Ф. Метод расчета четырехполосных переменных выравнивателей. — «Электросвязь», 1962, № 5. 45—50 с.
46. Каллер М. И. Теория электрических цепей. М., Трансжелдориздат, 1963. 495 с.
47. Листов В. Н. Элементарная теория фильтров. М., Трансжелдориздат, 1963. 170 с.

48. Ланне А. А. Оптимальный синтез линейных электрических цепей. М., «Связь», 1969. 292 с.
49. Лурье Б. Я. Проектирование транзисторных усилителей с глубокой обратной связью. М., «Связь», 1965. 150 с.
50. Левин Б. Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. М., «Советское радио», 1957.
51. Львович А. А., Гейсман Ю. В. Высокостабильные кварцевые генераторы на туннельных диодах. М., «Связь», 1970. 168 с.
52. Лэнди Р., Дэвис Д., Албрехт А. Справочник радионинженера. М.-Л., Госэнергоиздат, 1961. 704 с.
53. Ланге Ф. Корреляционная электроника. Л., Судпромгиз, 1963. 446 с.
54. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М., «Наука», 1968. 660 с.
55. Меркулов А. Г. Переменные выравнители. М., Связьиздат, 1960. 67 с.
56. Применение транзисторов в аппаратуре дальней связи. М., Связьиздат, 1963. 72 с.
57. Мейнике Х., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. М., Госэнергоиздат, т. I и II. 416, 576 с.
58. Многоканальная связь. Под ред. И. А. Аболица. М., «Связь», 1971. 493 с.
59. Мартюшов К. И., Зайцев Ю. В., Тихонов А. И. Методы расчета резисторов. М., «Энергия», 1971. 208 с.
60. Машинный расчет интегральных схем. М., «Мир», 1971. 407 с.
61. Мидлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. М., «Советское радио», 1961. Т. 1. 482 с.
62. Основные нормы и рекомендации МККФ. Дальняя связь. М., Связьиздат, 1948. 264 с.
63. Ортюзи Ж. Теория электронных цепей. Ч. 1. М., «Мир». 1970. 407 с.
64. Обозначения основных величин (буквенные). ГОСТ 1494—61. М., КСМИП, СМ.
65. Потрясай В. Ф., Рыжов А. С., Сутягин В. Я. Шумы транзисторов. — «Полупроводниковые приборы и их применение». М., «Советское радио», 1960, вып. 5.
66. Полякова Л. Н. Синтез входных и выходных цепей широкополосных усилителей. М., «Связь», 1966. 55 с.
67. Пухов Г. Е. Методы анализа и синтеза квазианалоговых электронных цепей. Киев, «Наукова думка», 1967. 568 с.
68. Полевые транзисторы. М., «Советское радио», 1971. 374 с.
69. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. М., «Наука», 1966. 404 с.
70. Райс С. Теория флуктуационных шумов. Сборник статей. «Теория передачи электрических сигналов при наличии помех». Перевод с англ. под ред. Н. А. Железнова. М., ИИЛ, 1953.
71. Рейнфельдер В. А. Разработка малошумящих входных цепей на транзисторах. М., «Связь», 1967. 146 с.
72. Радиоприемные устройства. Под ред. Н. В. Боброва. М., «Советское радио», 1971. 496 с.
73. Радиотехнические схемы на транзисторах и туннельных диодах. Под ред. Р. А. Валитова. М., «Связь», 1972. 464 с.
74. Сифоров В. И. Радиоприемники сверхвысоких частот. М., Воениздат, 1957. 635 с.
75. Сигорский В. П., Петренко А. И. Алгоритмы анализа электронных схем. Киев, «Техника», 1970. 394 с.

76. Стратонович Р. А. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. М., «Советское радио», 1961. 557 с.
77. Севин Л. Полевые транзисторы. М., «Советское радио», 1968. 181 с.
78. Славский Г. Н. Активные  $RLC$ - и  $RC$ -фильтры и избирательные усилители. М., «Связь», 1966. 216 с.
79. Соловьев Н. И. Измерительная техника в проводной связи. Ч. III. М., «Связь», 1971. 304 с.
80. Сельверстов Г. Г. Общие методы анализа шумовых линейных электрических цепей. — «Вопросы радиоэлектроники», серия XI, вып. 1, 1966.
81. Стафеев В. И. Некоторые проблемы микроэлектроники. Сборник статей «Микроэлектроника». Под ред. Ф. Л. Лукина. М., «Советское радио», 1967, вып. 1.
82. Суходоев И. В. Перспективы микроминиатюризации устройств аналоговой многоканальной связи. — «Полупроводниковые приборы в технике электросвязи». Под ред. И. Ф. Николаевского. М., «Связь», 1969, вып. 4.
83. Суходоев И. В. Шумовые параметры транзисторов. М., «Связь», 1967. 74 с.
84. Суходоев И. В. К оценке шумовых свойств цепей электрической связи. — «Электросвязь», 1966, № 4.
85. Суходоев И. В. Выражение шумовых свойств электрических цепей с распределенными параметрами. — «Вопросы радиоэлектроники», 1969, серия XI, вып. 4.
86. Суходоев И. В. Выражение шумовых свойств сложных соединений четырехполюсников. — «Вопросы радиоэлектроники», 1963, серия XI, вып. 3.
87. Суходоев И. В. Ступенчатое соединение шумящих четырехполюсников. — «Радиотехника и электроника», 1972, том XVII, № 10.
88. Суходоев И. В. Расчет цепей с операционными усилителями. — «Вопросы радиоэлектроники», серия XI, 1972, вып. 1.
89. Суходоев И. В. Линейные преобразования в шумящих цепях. — «Вопросы радиоэлектроники», серия II, 1973, вып. 1.
90. Стандарты института радиоинженеров по методам измерения шума в линейных четырехполюсниках. — «PYRE», 1960, том 48, № 1.
91. Собенин Я. А., Кобызева Н. Н. Расчет амплитудных выравнивателей. М., «Связь», 1969.
92. Таратута А. С. Шумы в транзисторах. УССР, Киев, Гостехиздат, 1963.
93. Транзисторы (справочник). Под ред. И. Ф. Николаевского. М., «Связь», 1969.
94. Трутко А. Ф. Методы расчета транзисторов. М., «Энергия», 1971. 272 с.
95. Термен Ф., Петтит Д. Измерительная техника в электронике. М., ИИЛ, 1955. 604 с.
96. Троицкий В. С. Флуктуации в нагруженной линии. ЖТФ, 1955, т. XXV, № 8, 1426 с.
97. Терпугов Н. В. Метод определения шумовых параметров четырехполюсников. — «Радиотехника», 1962, т. 17, № 11.
98. Тетерич Н. М. Генераторы шума и измерение шумовых характеристик. М., «Энергия», 1968. 215 с.
99. Трохименко Я. К. Метод обобщенных чисел и анализ линейных цепей. М., «Советское радио», 1972. 212 с.

100. **Тюрин В. Л., Листов В. Н., Высоцкий А. В.** Дальняя связь. М., Трансжелдориздат, 1957, 411 с.
101. **Фомин Н. Н., Королев Ю. Н.** Современные полупроводниковые приборы. М., «Знание», 1969. 80 с.
102. **Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р.** Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. М., «Связь», 1965. 352 с.
103. **Федотов Я. А.** Основы физики полупроводниковых приборов. М., «Советское радио», 1969.
104. **Фалькович С. Е., Музыка З. Н.** Чувствительность радиоприемных устройств с транзисторными усилителями. М., «Энергия», 1970. 128 с.
105. **Хаус Г., Адлер Р.** Теория линейных шумящих цепей. М., ИИЛ, 1963. 110 с.
106. **Харкевич А. А.** Борьба с помехами. М., «Наука», 1965. 275 с.
107. **Чаповский М. З.** Улучшение качественных показателей транзисторных усилителей. М., «Связь», 1968. 232 с.
108. **Черне Х. И.** Индуктивные связи и трансформации в электрических фильтрах. М., Связьиздат, 1962. 315 с.
109. **Черепанов В. И., Коневских В. М., Львов Н. В.** Газоразрядные источники шумов. М., «Советское радио», 1968. 55 с.
110. **Шапиро А. Я.** Обобщение новой теории автономного четырехполюсника на шумящие линейные цепи. — «Радиотехника», 1967, т. 22, № 9.
111. **Шор К. Г.** Малошумящие транзисторные усилители. М., «Энергия», 1971. 112 с.
112. **Шамшин В. М.** Параметры усилителей с обратной связью. — «Электросвязь», 1961, № 3.
113. **Ши Р. Ф.** Расчет транзисторных цепей. М., «Энергия», 1964. 263 с.
114. **Шумы** в электронных приборах. М.-Л. «Энергия», 1964.
115. **Шутенко М. С.** Малошумящие усилители СВЧ. М., Воениздат, 1966. 50 с.
116. **Электротехника, электроника.** Терминология. М., Изд. АН СССР, 1962. 231 с.
117. **Шеннон К. Е.** Связь при наличии шума. — «Труды по теории информации и кибернетике». Под. ред. А. Н. Колмогорова. М., ИИЛ, 1963.
118. **Dahlke W.** Transformationsregeln für rauschende Vierpole. — «AEU», 9, 1955.
119. **Fraenz K.** Sensitivity Limit in Receiving Systems and Realizability. — «ENT», 1939.
120. **Friss R.** Noise Figure of Radio Receiver. — «PIRE», 32, July, 1944.
121. **North D. O.** The absolute sensitivity of radio receivers. — «RCA Rev.», v. 6, 1942.
122. **Paul R.** Ein Beitrag zur Theory rauschender Vierpole. — «Nachrichtentechnik», Heft 12, 1958.
123. **Rothe H., Dahlke W.** Theory of noise Fourpoles. — «PIRE», 44, 1956, N 6.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Основные обозначения . . . . .	3
Предисловие . . . . .	5
<i>Глава 1.</i> Шумы элементов . . . . .	9
1.1. Классификация шумов . . . . .	9
1.2. Шумы резисторов, катушек и конденсаторов . . . . .	10
1.3. Шумы электронных ламп . . . . .	13
1.4. Шумы плоскостных диодов . . . . .	16
1.5. Шумы биполярных транзисторов . . . . .	19
1.6. Шумы униполярных транзисторов . . . . .	23
1.7. Шумы прочих элементов . . . . .	26
<i>Глава 2.</i> Оценка шумов . . . . .	30
2.1. Способы оценки . . . . .	30
2.2. Эквивалентный источник . . . . .	30
2.3. Эквивалентное сопротивление . . . . .	33
2.4. Эквивалентная температура . . . . .	35
2.5. Отношение сигнал/шум . . . . .	36
2.6. Коэффициент шума . . . . .	36
2.7. Мера шума . . . . .	43
<i>Глава 3.</i> Шумящий двухполюсник . . . . .	44
3.1. Системы параметров . . . . .	44
3.2. Последовательное соединение . . . . .	45
3.3. Параллельное соединение . . . . .	47
3.4. Последовательно-параллельное соединение . . . . .	48
3.5. Параллельно-последовательное соединение . . . . .	49
<i>Глава 4.</i> Шумящий четырехполюсник . . . . .	65
4.1. Системы параметров . . . . .	65
4.2. Схемы замещения . . . . .	74
4.3. Корреляционные соотношения . . . . .	78
4.4. Первичные шумовые параметры . . . . .	91
4.5. Вторичные шумовые параметры . . . . .	100
4.6. Характеристические шумовые параметры . . . . .	111
4.7. Неизменный коэффициент шума . . . . .	125
<i>Глава 5.</i> Соединения шумящих четырехполюсников . . . . .	128
5.1. Сложные соединения . . . . .	128
5.2. Последовательное соединение . . . . .	129
5.3. Параллельное соединение . . . . .	131
5.4. Последовательно-параллельное соединение . . . . .	134

5.5. Параллельно-последовательное соединение . . . . .	137
5.6. Ступенчатое (каскадное) соединение . . . . .	140
5.7. Цепи с распределенными параметрами . . . . .	147
5.8. Результирующий коэффициент шума . . . . .	156
<i>Глава 6. Соединения двух шумящих четырехполюсников . . . . .</i>	<i>159</i>
6.1. Разновидности соединений . . . . .	159
6.2. Соединения неделимых четырехполюсников . . . . .	159
6.3. Соединения составных четырехполюсников . . . . .	166
6.4. Соединения неделимых и составных четырехполюсников . . . . .	171
6.5. Соединения четырехполюсника с трансформаторов . . . . .	238
6.6. Регулярные и нерегулярные соединения . . . . .	245
<i>Глава 7. Шумящая система . . . . .</i>	<i>248</i>
7.1. Обобщенная модель . . . . .	248
7.2. Шумовые токи и напряжения . . . . .	249
7.3. Коэффициент шума . . . . .	252
7.4. Минимизация коэффициента шума . . . . .	264
7.5. Характеристические показатели шума . . . . .	265
<i>Глава 8. Влияние несогласованности на показатели шума . . . . .</i>	<i>287</i>
8.1. Показатели рассогласованности . . . . .	287
8.2. Шумовые токи и напряжения . . . . .	287
8.3. Несогласованный четырехполюсник . . . . .	308
8.4. Несогласованная система . . . . .	310
<i>Приложения . . . . .</i>	<i>313</i>
<i>Список литературы . . . . .</i>	<i>345</i>

**Игорь Васильевич Суходоев**

**ШУМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ (ТЕОРИЯ)**

Редактор **В. Е. Володарская**  
Художник **А. Г. Свердлов**  
Художественные редакторы **Т. Ф. Евсенина, С. Ф. Романова**  
Корректор **Л. П. Текунова**

---

Сдано в набор 27/I 1975 г. Подп. в печ. 22/IV 1975 г.  
Т-08408 Формат 84×108<sup>1/32</sup> Бумага тип. № 2 18,48 усл.-печ. л. 18,66 уч.-изд. л.  
Тираж 7000 экз Изд. № 15650 Зак. № 34 Цена 1 руб. 72 коп.  
Издательство «Связь». Москва 101000, Чистопрудный бульвар, д. 2

---

Типография издательства «Связь» Госкомиздата СССР  
Москва, 101000, ул. Кирова, д. 40

