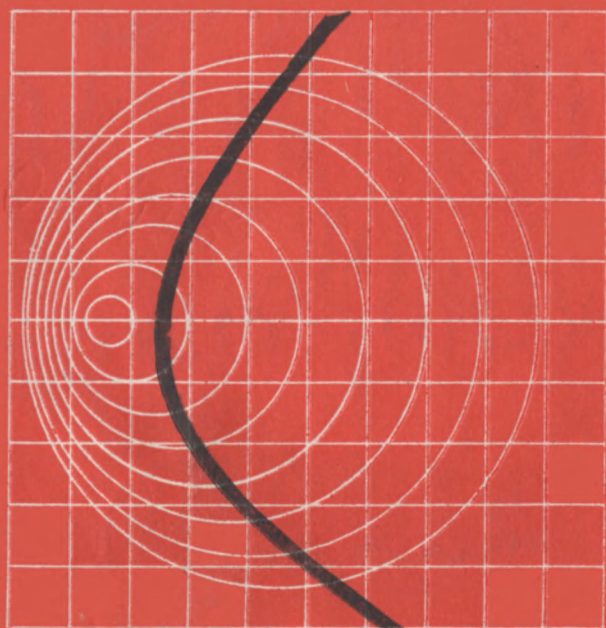


И. В. СУХОДОЕВ



Шум

ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЦЕПЕЙ

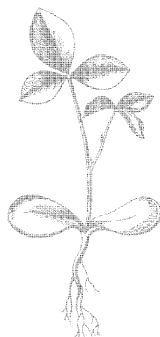
И. В. СУХОДОЕВ

ШУМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

(Расчет)



ИЗДАТЕЛЬСТВО СВЯЗЬ
МОСКВА 1976



Scan AAW

6Ф0.1

С91

УДК 621.372.061+621.391.82 ,.

Суходоев И. В.

С91 Шумы электрических цепей (Расчет). М., «Связь», 1976.

120 с. с ил.

В книге излагаются методы расчета собственных шумов линейных электрических цепей, содержащих традиционные пассивные элементы и их аналоги, транзисторы, электронные лампы и операционные усилители. Приводятся примеры расчета и экспериментальные данные, программы для ЭВМ.

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

С $\frac{30602-028}{045(01)-76}$ БЗ-74-14-1975

6Ф0.1

Игорь Васильевич Суходоев

ШУМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ (РАСЧЕТ)

Редактор В. Е. Володарская
Художник А. Г. Свердлов
Технические редакторы С. Ф. Романова, Г. И. Колосова
Корректор Л. И. Чекрыжова

Сдано в набор 2/XII 1975 г.	Подп. в печ. 22/I 1976 г.
T-01530 Формат 84×108/32	Бумага тип. № 2 6,3 усл.-печ. л.
6,38 уч.-изд. л. Тираж 3500 экз.	Изд. № 17515 Зак. 253 Цена 51 коп.
Издательство «Связь» Москва 101000, Чистопрудный бульвар, д. 2	

Типография издательства «Связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул. Кирова, д. 40

ПРЕДИСЛОВИЕ

Расчет собственных шумов и минимизация влияния их на сигнал занимают центральное место при проектировании многих устройств электросвязи и радиотехнического оборудования. Резкое увеличение количества полупроводниковых приборов в аппаратуре, наблюдаемое при переходе на методы микроэлектроники, усложнило расчеты и решения оптимизационных задач. Это потребовало дальнейшего развития теории шумов электрических цепей с учетом особенностей микроэлектроники, составившей содержание первой книги «Шумы электрических цепей» (Теория). Ограниченный объем книги не позволил изложить в ней методы расчета собственных шумов электрических цепей — им посвящена предлагаемая работа. Последняя является логическим развитием и продолжением первой книги, и поэтому все сказанное в предисловии к ней в полной мере относится ко второй.

Основным разделам предшествует краткое изложение методов определения шумовых параметров четырехполюсника. Это вызвано ограниченностью паспортных данных на элементы (транзисторы, микросхемы, аналоги пассивных элементов и др.), которые совершенно недостаточны для точного расчета шумов электрических цепей и оптимизации их по критерию шумозащищенности.

Использование единой теоретической базы при разработке обобщенных методов расчета шумов пассивных и активных цепей позволило достичь их совместимости. Преимущества этого наиболее полно раскрываются при расчете шумов смешанных структур, содержащих, например, транзисторы, электронные лампы, операционные усилители, с одной стороны, и резисторы, конденсаторы, катушки или их аналоги — с другой.

При разработке методов расчета принималась во внимание возможность применения «малых» и «больших» ЭВМ. В соответствии с этим приведенные в работе формулы шумовых параметров по сложности представляют несколько категорий: обобщенные формулы для соединений, содержащих любое наперед заданное число μ -элементов (аппаратурные комплексы), формулы для смешанных соединений активных и пассивных элементов (функциональные узлы и блоки), формулы для типичных звеньев пассивных фильтров, корректоров и различного вида RC -цепей. Для приближенных расчетов шумо-

вых параметров LC -цепей даны формулы при пренебрежении потерями в высокодобротных элементах.

Использование соответствующих характеру решаемой задачи расчетных соотношений позволяет избежать рутинных операций, отнимающих обычно много сил и времени. Большое количество приведенных формул шумовых параметров различного вида цепей охватывает широкий круг функциональных устройств, структурно ограниченных лишь условиями регулярности. Целесообразный порядок вычислительных процедур при этом раскрыт на конкретных примерах и поясняется в методике расчета шумов усилителей с обратными связями. Программы расчета шумов на ЭВМ, записанные на языке «Алгол-60», позволяют рассчитывать шумы сложных цепей, образуемых из регулярных соединений четырехполюсников.

Возможности и границы применения предлагаемых методов расчета шумов окончательно уточняются в завершающем разделе, где выделяется круг задач, которые целесообразно решать на основе общих методов теории линейных цепей.

В заключение следует отметить, что изложенные методы расчета шумов в силу общности применимы также к цепям с распределенными параметрами и оптоэлектронным устройствам.

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».

Автор

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

1.1. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

И известны несколько способов определения первичных шумовых параметров четырехполюсника. В одном случае они рассчитываются по известной схеме замещения [7, 11, 34, 44], в другом — определяются экспериментальным путем [26, 35, 40]. Паспортные данные на обычные компоненты электрических цепей пока не содержат первичных шумовых параметров, на некоторые интегральные устройства они задаются частично, поэтому приходится определять их одним из указанных способов.

Если известна шумовая схема замещения четырехполюсника, то первичные шумовые параметры могут быть рассчитаны по ее составляющим. При определении параметров таким способом следует иметь в виду, что для одного и того же элемента можно найти не одну шумовую схему замещения. Составляющие ее обычно зависят от частоты, смещений по постоянному току и ряда других факторов.

По мере развития микроэлектроники, сопровождаемого все возрастающей интеграцией элементов, нахождение физических схем замещения становится все более затруднительным. В дальнейшем, с освоением сложных интегральных структур, способ определения шумовых параметров по схемам замещения для разработчиков аппаратуры вряд ли окажется приемлемым.

Используемые в настоящее время методы экспериментального определения первичных шумовых параметров активных элементов базируются на измерении коэффициента шума. Они требуют большой тщательности в проведении измерений и выполнения на заключительной стадии расчетных операций. Пока не создано приборов для непосредственного измерения первичных шумовых параметров, поэтому повсеместно косвенные методы находят практическое применение.

1.2. МЕТОД ГРАФИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ

Метод основывается на измерении коэффициента шума при различных сопротивлениях (проводимостях) источника сигнала [26]. При определении параметров $R_{шн}$,

$G_{ша}$ или $G_{шн}$, $R_{ша}$ принимают соответственно $X_{кор}=0$ или $B_{кор}=0$. В результате при $Z_1=R_1$ ($X_1=0$) или $Y_1=G_1$ ($B_1=0$) на основании общего выражения коэффициента шума [35] определяют

$$F_{и} = \frac{[R_{ша} + G_{ша}(R_1 + 2R_{кор})^2]}{R_1} \quad \text{или} \quad (1.1)$$

$$F_{и} = \frac{[G_{ша} + R_{ша}(G_1 + 2G_{кор})^2]}{G_1} \quad (1.2)$$

Используя функции $F_{и}=\varphi_1(R_1)$ и $F_{и}=\varphi_2(G_1)$, получают графические зависимости, представленные на рис. 1.1а и 1.1б. Определяются они при полосе пропускания

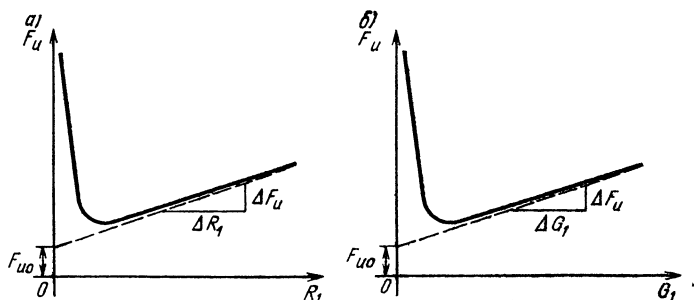


Рис. 1.1. Определение первичных шумовых параметров:

а) $G_{ша}$, $R_{кор}$, б) $R_{ша}$, $G_{кор}$

$\Delta f \rightarrow 0$, но и при $\Delta f \approx 0,2 f_0$ (f_0 — средняя частота) проведение измерений еще считается допустимым.

Асимптотами функций (1.1) являются прямые:

$$\varphi_3(R_1) = G_{ша}(R_1 + 2R_{кор}), \quad \varphi_4(G_1) = R_{ша}(G_1 + 2G_{кор}), \quad (1.3)$$

по углу наклона которых определяются шумовые параметры:

$$G_{ша} = \frac{\Delta F_{и}}{\Delta R_1}, \quad R_{ша} = \frac{\Delta F_{и}}{\Delta G_1}, \quad (1.4)$$

а при $G_1=0$ и $R_1=0$ соответственно:

$$R_{кор} = \frac{F_{и0}}{2G_{ша}}, \quad G_{кор} = \frac{F_{и0}}{2R_{ша}}. \quad (1.5)$$

Мнимые составляющие корреляционного сопротивления и проводимости шума находятся по минимальному

коэффициенту шума, достигаемому при шумовом сопряжении:

$$X_{\text{кор}} = -X_1 \text{ или } B_{\text{кор}} = -B_1.$$

Метод графических построений не обладает высокой точностью и сопряжен с вспомогательными построениями.

1.3. МЕТОД ДВУХ ИЗМЕРЕНИЙ

Связанные с рассмотренным выше способом неудобства в виде графических построений отсутствуют в другом методе, основывающемся также на измерении коэффициента шума четырехполюсника [40]. Коэффициент шума измеряется при двух значениях внутренней проводимости источника сигнала $G^{(1)}_1$ и $G^{(2)}_1$. На основании (1.2) определяется разность между полученными коэффициентами шума:

$$F^{(1)} - F^{(2)} = G_{ш а} \left(\frac{1}{G^{(1)}_1} - \frac{1}{G^{(2)}_1} \right) + R_{ш а} (G^{(1)}_1 - G^{(2)}_1). \quad (1.6)$$

При малых проводимостях

$$F^{(1)} - F^{(2)} \approx G_{ш а} \left(\frac{1}{G^{(1)}_{10}} - \frac{1}{G^{(2)}_{10}} \right) = G_{ш а} (R^{(1)}_{1\infty} - R^{(2)}_{1\infty}), \quad (1.7)$$

где дополнительные обозначения в индексах $(0, \infty)$ указывают на порядок величины внутреннего сопротивления (проводимости) источника сигнала.

Из (1.7) определяется шумовой параметр

$$G_{ш а} = \frac{F^{(1)} - F^{(2)}}{R^{(1)}_{1\infty} - R^{(2)}_{1\infty}}. \quad (1.8)$$

При больших проводимостях

$$F^{(1)} - F^{(2)} \approx R_{ш а} (G^{(1)}_{1\infty} - G^{(2)}_{1\infty}), \quad (1.9)$$

откуда находится приближенное значение шумового параметра

$$R_{ш а} = \frac{F^{(1)} - F^{(2)}}{G^{(1)}_{1\infty} - G^{(2)}_{1\infty}}. \quad (1.10)$$

Вещественная составляющая корреляционной проводимости шума рассчитывается по формуле

$$G_{\text{кор}} = \frac{F_{\text{и опт}} - 2(R_{ш а} G_{ш а})^{1/2}}{2R_{ш а}}, \quad (1.11)$$

в которой оптимальный избыточный коэффициент шума достигается при внутреннем сопротивлении источника сигнала

$$G_{1\text{опт}} = \left(\frac{G_{\text{ш а}}}{R_{\text{ш а}}} \right)^{1/2}, \quad (1.12)$$

обеспечивающим наибольшую точность определения $G_{\text{кор}}$.

Правильность выбора значений $R_{10}=1/G_{1\infty}$ и $R_{1\infty}=1/G_{10}$ проверяется по выполнению неравенств:

$$G_{\text{ш а}} \left(\frac{1}{G_{10}^{(1)}} - \frac{1}{G_{10}^{(2)}} \right) \gg R_{\text{ш а}} (G_{10}^{(1)} - G_{10}^{(2)}), \quad (1.13)$$

$$G_{\text{ш а}} \left(\frac{1}{G_{10}^{(1)}} - \frac{1}{G_{10}^{(2)}} \right) \ll R_{\text{ш а}} (G_{1\infty}^{(1)} - G_{1\infty}^{(2)}), \quad (1.14)$$

при одинаковой степени неравенств:

$$G_{1\text{опт}} = (G_{10}^{(1)} G_{10}^{(2)} G_{1\infty}^{(1)} G_{1\infty}^{(2)})^{1/4}, \quad R_{1\text{опт}} = (R_{10}^{(1)} R_{10}^{(2)} R_{1\infty}^{(1)} R_{1\infty}^{(2)})^{1/4}. \quad (1.15)$$

Для определения реактивной составляющей корреляционной проводимости шума в данной методике рекомендуются следующие соотношения:

— при $R_1=0$ и $X_1=\omega L_1$

$$B_{\text{кор}} = \frac{1}{2} \left[G_{\text{ш а}} \frac{X_1}{R_{\text{ш а}}} + \frac{1}{X_1} \right] - \frac{|E_1|^2}{24kT \Delta f R_{\text{ш а}} X_1}; \quad (1.16)$$

— при $R_1=0$ и $X_1=1/\omega C_1$

$$B_{\text{кор}} = \frac{|E_1|^2}{24kT \Delta f R_{\text{ш а}} X_1} - \frac{1}{2} \left(G_{\text{ш а}} \frac{X_1}{R_{\text{ш а}}} + \frac{1}{X_1} \right), \quad (1.17)$$

где E_1 — задающее напряжение известного источника сигнала (синусоидального или шумового).

Если используется генератор шума, то (1.16) и (1.17) приводятся соответственно к виду:

$$B_{\text{кор}} = \frac{1}{2} \left(X_1 \frac{G_{\text{ш а}}}{R_{\text{ш а}}} + \frac{1}{X_1} - \frac{R_{\text{ш1}}}{3R_{\text{ш а}} X_1} \right),$$

$$B_{\text{кор}} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_{\text{ш1}}}{3R_{\text{ш а}} X_1} - X_1 \frac{G_{\text{ш а}}}{R_{\text{ш а}}} + \frac{1}{X_1} \right), \quad (1.18)$$

где $R_{\text{ш1}}$ — эквивалентное шумовое сопротивление генератора шума; X_1 — реактивная составляющая его внутреннего сопротивления.

При вычислении $B_{\text{кор}}$ по (1.18) получают различные знаки — при выводе формул однозначно прини-

малось только его положительное значение. Если $B_{\text{кор}}$ принимает положительное значение при $X_1 = \omega L$, то она носит емкостный характер. В том случае, когда эта величина положительна при $X_1 = 1/\omega C_1$, она имеет индуктивный характер.

На точность определения составляющих $X_{\text{кор}}$ существенно влияет выбор величин R_1 и X_1 . Зависит она и от степени корреляции между внутренними источниками шума четырехполюсника.

При незначительной корреляции между источниками флуктуаций вполне достаточно измерить коэффициенты шума при малом и большом сопротивлениях источника сигнала. В этом случае шумовые параметры рассчитываются по формулам:

$$R_{\text{ша}} = F_{\text{н}} R_{10}, \quad G_{\text{ша}} = \frac{F_{\text{н}}}{R_{1\infty}}, \quad (1.19)$$

число их ограничивается двумя — корреляционная проводимость шума принимается равной нулю.

1.4. МЕТОД ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН

Рассмотренные методы определения первичных шумовых параметров построены на допущениях. Параметры $R_{\text{ша}}$ и $G_{\text{ша}}$ находятся без учета корреляционных связей между источниками шума четырехполюсника. Известен принципиально точный метод определения первичных шумовых параметров четырехполюсника, который основывается на измерении экстремальных значений коэффициента шума [34].

При шумовом согласовании четырехполюсника коэффициент шума принимает оптимальное значение, а минимальное — при шумовом сопряжении.

Исходя из этих условий, определим эквивалентную шумовую проводимость

$$G_{\text{ша}} = \frac{F_{\text{н опт}} - F_{\text{н мин}}}{2(R_{1\text{опт}} - R_{1\text{мин}})} \quad (1.20)$$

и найдем вещественную составляющую корреляционного сопротивления шума:

$$R_{\text{кор}} = \frac{F_{\text{н мин}}}{2G_{\text{ша}}} - R_{1\text{мин}}. \quad (1.21)$$

Мнимая составляющая корреляционного сопротивления шума определяется из $X_{\text{кор}} = -X_1$.

Эквивалентное шумовое сопротивление равно

$$R_{\text{шн}} = G_{\text{ш а}} (R_{\text{имн}}^2 - R_{\text{кор}}^2). \quad (1.22)$$

Приведенные формулы позволяют рассчитать первичные шумовые параметры четырехполюсника по измеренным экстремальным значениям коэффициента шума и соответствующим внутренним сопротивлениям источника сигнала.

Экстремальные значения коэффициента шума измеряются в определенной последовательности. Вначале при некотором произвольном сопротивлении источника сигнала (шума) $Z_1^{(1)} = R_1^{(1)} + iX_1^{(1)}$ измеряется коэффициент шума, затем измерения повторяются при значении $Z_1^{(2)} = R_1^{(2)} - iX_1^{(2)}$, отличающемся от первого характером реактивной составляющей. По величине коэффициентов шума $F_{\text{н}}^{(1)}$ и $F_{\text{н}}^{(2)}$, измеренных в условиях $R_1^{(1)} = R_1^{(2)}$ и $X_1^{(1)} = X_1^{(2)}$ (при $X_1^{(1)} = \omega L_1$ и $X_1^{(2)} = 1/\omega C_1$), можно сразу же судить о наличии или отсутствии корреляции между источниками шума. Равенство коэффициентов шума указывает на отсутствие корреляции и, наоборот, неравенство подтверждает ее наличие. При незначительном различии $F_{\text{н}}^{(1)}$ и $F_{\text{н}}^{(2)}$ полезно измерения повторять при измененных величинах активной и реактивной составляющих сопротивления источника сигнала.

Если коэффициент шума достигает минимальной величины при индуктивной составляющей сопротивления источника сигнала, то это указывает на емкостный характер реактивной составляющей корреляционного сопротивления шума. Обратная зависимость является свидетельством его индуктивного характера.

После определения минимального коэффициента шума и соответствующих условий находится оптимальное его значение при некоторой активной составляющей сопротивления источника сигнала. Полученные значения подставляются в (1.20) — (1.22), и по ним рассчитываются первичные шумовые параметры четырехполюсника.

Метод экстремальных значений коэффициента шума требует весьма тщательных измерений и достаточно точного измерительного оборудования, в состав которого должен входить генератор шума (или синусоидального

сигнала) с изменяемым активным сопротивлением, дополняемым по мере необходимости переменными реактивными составляющими емкостного или индуктивного характера.

1.5. ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Использование метода экстремальных значений поясним на примере определения шумовых параметров биполярных транзисторов. Для определения первичных шумовых параметров транзисторов, в принципе, может быть использован любой из известных способов измерения коэффициента шума четырехполюсника [18, 39]. Но наиболее удобен метод генератора шума, обладающий существенными достоинствами в сравнении с другими. Спектральные характеристики генератора шума и транзистора в узкой полосе частот весьма близки, поэтому не требуется дополнительного определения эффективной полосы частот. Точность измерений в основном определяется характеристиками шумового генератора и погрешностью измерения мощности шума на выходе транзистора. Ко всему этому генератор шума на насыщенном диоде в широкой полосе частот обладает весьма высокой стабильностью.

Структурная схема измерительного комплекса, использованного при определении первичных шумовых параметров биполярных транзисторов, представлена на рис. 1.2. Она содержит: Γ — генератор шума с перемен-

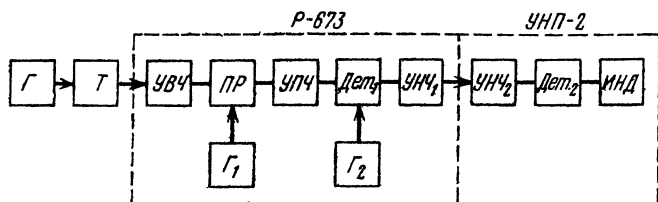


Рис. 1.2. Структурная схема измерительного комплекса для определения шумовых параметров транзистора:

Γ — генератор шумового сигнала, T — исследуемый транзистор, $УВЧ$ — усилитель высокой частоты, $ПР$ — преобразователь частоты, Γ_1 — первый гетеродин, $УПЧ$ — усилитель промежуточной частоты, $Дет_1$ — линейный детектор, $УНЧ_1$ — первый усилитель низкой частоты, Γ_2 — второй гетеродин (не используется), $УНЧ_2$ — второй усилитель низкой частоты, $Дет_2$ — квадратичный детектор, $ИИД$ — индикатор на выходе

ным внутренним сопротивлением, выполненный на шумовых диодах типа ДШ2-10, анодный ток которых плавно регулируется от 0 до 20 мА; T — измеряемый транзистор с плавной регулировкой тока эмиттера от 0 до 10 мА и напряжения коллектора от 0 до 10 В; Р-673 — радиоприемное устройство для непрерывного диапазона частот от 12 до 25 000 кГц, с шириной полосы пропускания 1,5 и 3,0 кГц, усиление которого регулируется в 1000 раз по промежуточной частоте и более чем в 100 раз по низкой; УНП-2 — ламповый вольтметр с квадратичным детектором, имеющий чувствительность от 1,5 до 1500 мВ.

Принципиальная электрическая схема генератора шума с изменяемым выходным сопротивлением представлена на рис. 1.3. Реактивный характер его по необходи-

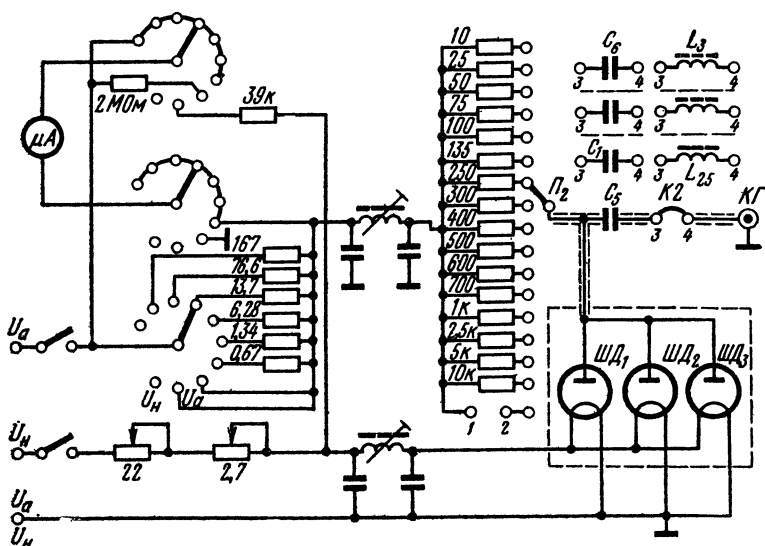


Рис. 1.3. Принципиальная электрическая схема генератора шума с изменяемым выходным сопротивлением

мости устанавливается емкостным или индуктивным и задается подключаемыми к генератору шума магазинами емкостей или индуктивностей, образуемыми наборами конденсаторов C_1 — C_6 от $50 \cdot 10^{-6}$ мкФ до 0,1 мкФ и катушек L_3 — L_{25} от 10 мкГ до 0,8 Г.

1.6. ШУМОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНЗИСТОРОВ

Процесс определения шумовых параметров состоит из двух стадий. Вначале проводятся вспомогательные (обзорные) исследования, ставящие целью расширение представлений о шумовых свойствах транзисторов, в частности, выясняется зависимость коэффициента шума от напряжения на коллекторе, тока эмиттера и характера изменения его с частотой. Например, для транзисторов типов П410 и П411 было установлено, что коэффициент шума большинства обследованных экземпляров существенно зависит от частоты: в диапазоне до 100—200 кГц с возрастанием частоты он уменьшается, после чего сохраняется почти неизменным до 1,0—2,0 МГц, а затем начинает возрастать (рис. 1.4а)¹). Зависимость коэффициента шума транзисторов от смещения эмиттера определялась при токах 0,5—5,0 мА в диапазоне частот от 12 кГц до 1 МГц. В результате выяснилось, что наиболее благоприятный режим создается при смещении эмиттера током около 1,0 мА (рис. 1.4б), причем с уменьшением частоты отчетливость установленного оптимума возрастает.

Измерение коэффициента шума при различных коллекторных напряжениях показало, что в интервале от 0,5 до 5,0 В шумовые свойства транзисторов практически не зависят от смещения коллектора (рис. 1.4в). Первичные шумовые параметры транзисторов, определенные по методу экстремальных значений, представлены в табл. 1.1. Основные шумовые показатели этих транзисторов, рассчитанные по найденным параметрам, приводятся ниже в сравнении со снятыми экспериментально зависимостями.

На рис. 1.5а и б представлен коэффициент шума в виде функции активной составляющей сопротивления источника сигнала при равных и неизменных реактивных составляющих емкостного и индуктивного характера. Полученные зависимости показывают, что оптимальный коэффициент шума, как и следовало ожидать, достигает оптимума при определенной активной составляющей. Последняя имеет тем большую величину, чем существенней влияние реактивной составляющей.

¹) Измерения производились при включении транзисторов по схеме с общим эмиттером.

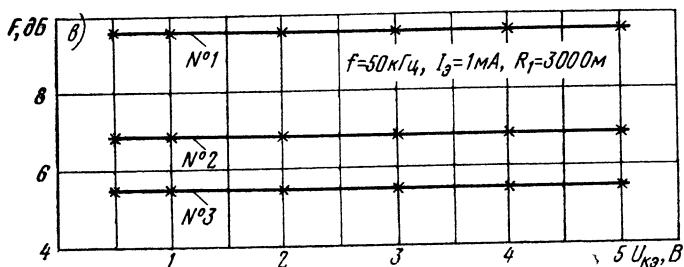
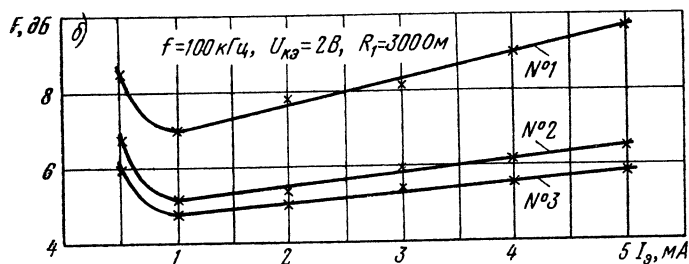
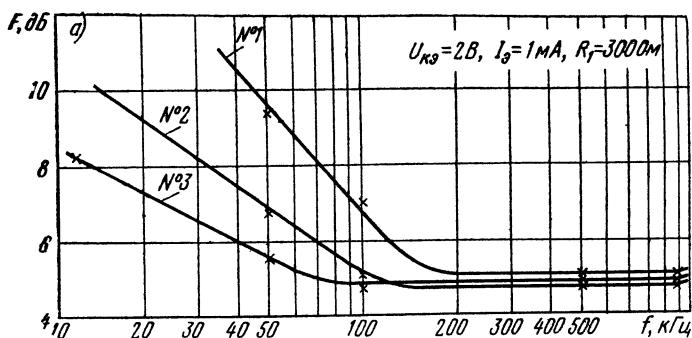


Рис. 1.4. Зависимость коэффициента шума транзисторов типов П-410 и П-411:

а) от частоты, б) тока эмиттера, в) напряжения между эмиттером и коллектором

Изображенные на рис. 1.6а и б зависимости характеризуют коэффициент шума как функцию реактивной составляющей сопротивления источника сигнала при неизменных значениях активных составляющих. В этом случае наименьший коэффициент шума достигается при реактивной составляющей индуктивного характера.

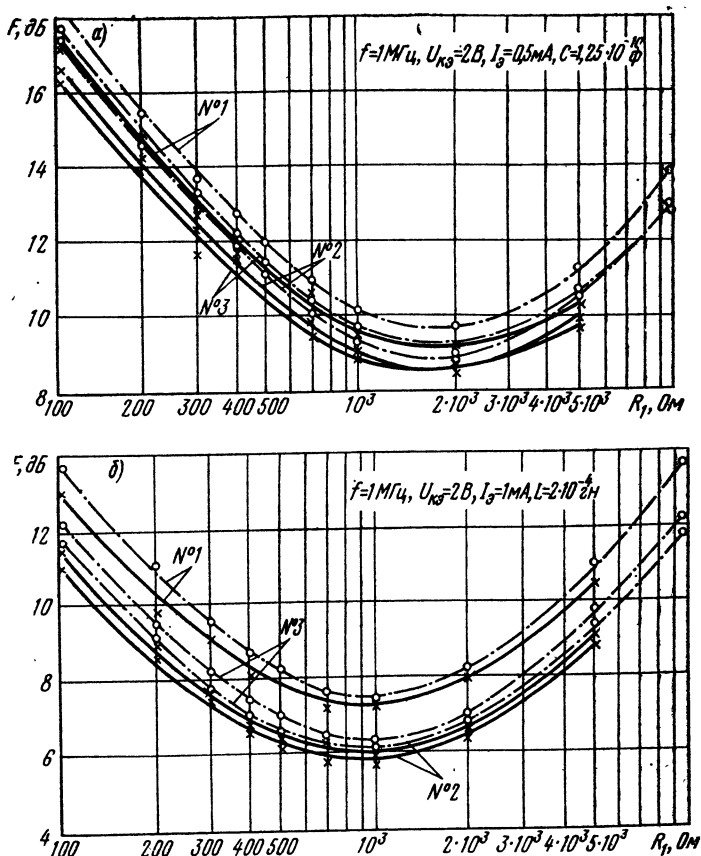


Рис. 1.5. Зависимость коэффициента шума транзистора типов П-410 и П-411 от активной составляющей сопротивления источника сигнала:

а) емкостного характера, б) индуктивного

Весьма показательно сопоставление полученных в обоих случаях результатов при равных по абсолютным величинам, но обратных по знакам реактивных составляющих сопротивления генератора шума (что достигалось заведомым подбором величин емкостей и индуктивностей, составляющих соответственно $C_1=1.25 \cdot 10^{-10}\text{ Ф}$ и $L_1=2.0 \cdot 10^{-4}\text{ Г}$). Сравнение представленных на рис. 1.7а, б зависимостей показывает, что коэффициент шума при индуктивных составляющих сопротивления генератора шума имеет меньшие значения, чем при соответствующим

16 Таблица 1.1

Тип транзистора	Параметр	Размерность	$U_{кз} = 2,0 \text{ В}$			
			0,5 мА	1,0 мА	2,0 мА	5,0 мА
П-411	$R_{шн}$	Ом	202	200	232	264
	$G_{ша}$	См	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
	$R_{кор}$	Ом	75	16	12	10
	$X_{кор}$	Ом	-376	-314	-188	-125
П-411	$R_{шн}$	Ом	202	175	204	211
	$G_{ша}$	См	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
	$R_{кор}$	Ом	105	62	7	4
	$X_{кор}$	Ом	-439	-376	-188	-125
П-410	$R_{шн}$	Ом	272	253	273	254
	$G_{ша}$	См	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
	$R_{кор}$	Ом	98	37	25	14
	$X_{кор}$	Ом	-502	-376	-250	-125

Примечание. Измерения проводились на частоте 1 МГц.

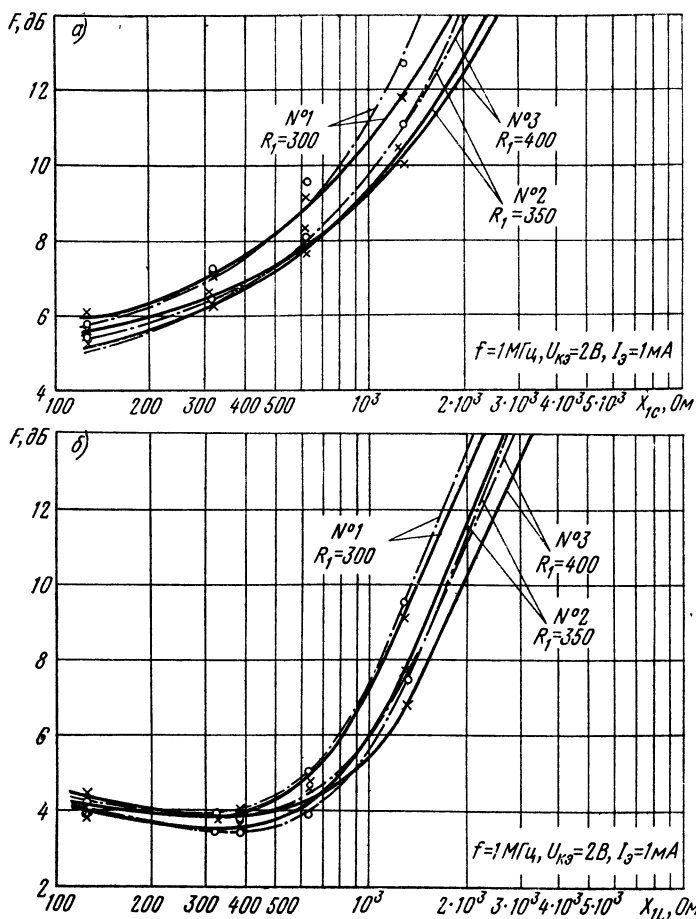


Рис. 1.6. Зависимость коэффициента шума транзисторов типов П-410 и П-411 от реактивной составляющей сопротивления источника сигнала:

а) емкостного характера, б) индуктивного

щих равных по абсолютной величине емкостных составляющих. Объясняется это влиянием реактивной составляющей корреляционного сопротивления шума, имеющей емкостный характер, которая частично или полностью компенсируется при индуктивном сопротивлении генератора шума. Тем самым достигается частичное или полное выполнение условий сопряжения по шумам.

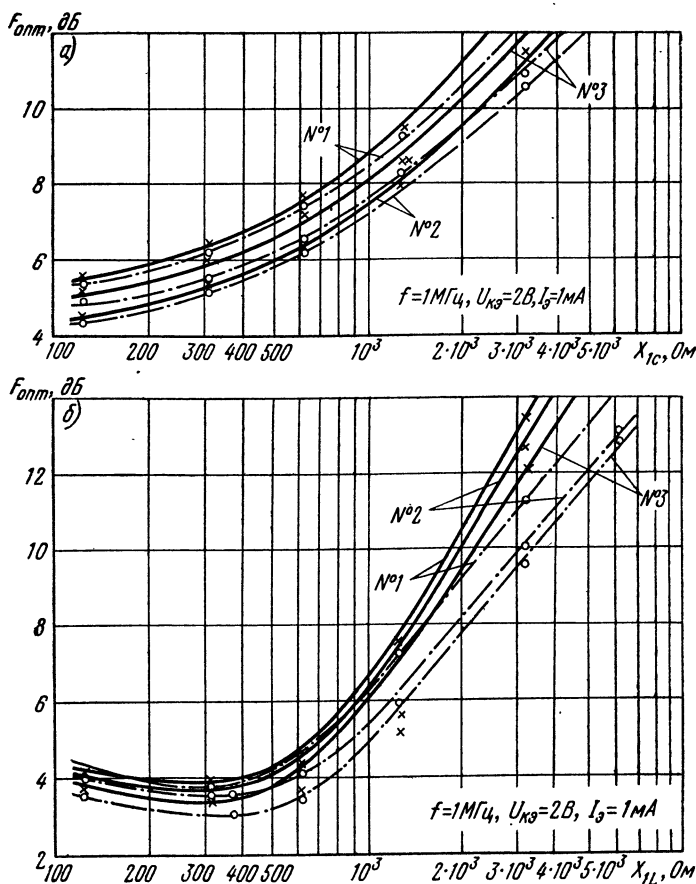


Рис. 1.7. Зависимость оптимального коэффициента шума транзисторов типов П-410 и П-411 от реактивной составляющей сопротивления источника сигнала:
а) емкостного характера, б) индуктивного

На рис. 1.8а, б представлено оптимальное сопротивление в виде функции реактивной составляющей сопротивления источника сигнала емкостного характера. Из этих зависимостей видно, что оптимальное сопротивление убывает с уменьшением емкостной составляющей сопротивления источника сигнала.

При индуктивном характере сопротивления источника сигнала его оптимальная активная составляющая с уменьшением реактивности убывает до определенной величины, а затем начинает возрастать. В этом проявляется

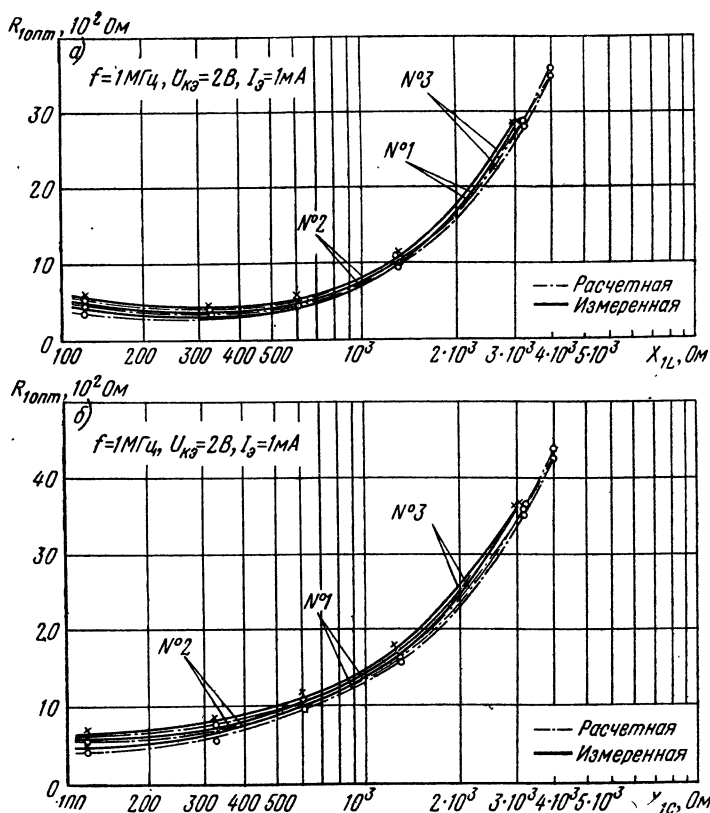


Рис. 1.8. Зависимость оптимальной активной составляющей сопротивления источника сигнала для транзисторов типов П-410 и П-411 от реактивной компоненты:

а) индуктивного, б) емкостного характера

ся влияние емкостной реактивной составляющей корреляционного сопротивления шума.

Экспериментальные и расчетные данные, как показывает их сопоставление, близки по величине и характеру зависимостей. Наблюдаемое некоторое их расхождение можно отнести к погрешностям измерительного оборудования, которые неизбежны из-за наличия паразитных емкостей. Последние на частотах уже в несколько сотен килогерц начинают оказывать шунтирующее влияние, особенно заметное при высоких сопротивлениях генератора шума

РАСЧЕТ ШУМОВ ПАССИВНЫХ ЦЕПЕЙ

2.1. ПАССИВНЫЕ ЦЕПИ

Пассивные цепи широко применяются при создании фильтров, корректоров, удлинителей и других функциональных узлов. Отдельные пассивные элементы или их соединения используются во вспомогательных цепях активных элементов — для постоянного смещения, температурной стабилизации транзисторов, осуществления обратных связей и т. д. [3, 8, 15, 17, 21, 43, 45].

Пассивные элементы содержат в себе источники шума той или иной интенсивности. Иногда без заметного ущерба для точности расчетов ими пренебрегают, например, в цепях промежуточных и оконечных ступеней многокаскадных усилителей. Но во многих других случаях пренебрежение ими недопустимо, так как может существенно исказить результаты расчетов. Это, в первую очередь, относится к пассивным элементам входных цепей усилителей и элементам, используемым в первом каскаде или в цепях общих отрицательных обратных связей (с выхода на вход). Реактивные пассивные элементы, даже если их собственные флуктуации крайне незначительны, могут заметно влиять на отношение сигнал/шум при использовании в цепях с активными элементами, в которых коррелированы источники шума. Особое место занимают аналоги пассивных элементов: диффузионные резисторы, барьерные емкости, гираторные индуктивности и оптроны, получаемые на базе полупроводниковых материалов и приборов. Повышенные шумы в них обуславливаются явлениями теплового характера и специфичными для полупроводников процессами.

Развитие микроэлектроники и базирующегося на ней направления микроминиатюризации сопровождается все возрастающим применением полупроводниковых аналогов пассивных элементов, которые обладают ценным свойством технологической совместимости с активными микроэлементами. Поэтому при использовании аналогов расчетам шумов пассивных цепей приходится уделять не меньшее внимание, чем обычно требуется для активных

элементов. К этому вынуждает и ослабление сигнала в пассивных цепях.

Шумовые параметры пассивных четырехполюсников в обобщенном виде, полученные в [35], обладают крайне важным свойством совместимости с аналогичными показателями активных элементов. Они в полной мере характеризуют шумовые свойства пассивных четырехполюсников, применение их существенно упрощает расчет шумов в сложных соединениях и построение математических моделей, в том числе оптимальных по критерию шумозащищенности [35, 36].

Придерживаясь общепринятой классификации, рассмотрим наиболее типичные функциональные цепи, имея главной целью получение расчетных соотношений, удобных для практического применения. При этом будем исходить из возможности реализации их как на обычных пассивных элементах, так и на их полупроводниковых аналогах, приняв для проводимостей $G_{\text{ш}i} \geq G_i$ и сопротивлений $R_{\text{ш}i} \geq R_i$ ($i=1, 2, 3, \dots, \mu$).

При расчете шумов различного рода функциональных цепей часто приходится прибегать к преобразованиям шумовых схем замещения отдельных элементов, приводить их к удобному для рассматриваемой структуры виду. Наиболее типичные преобразования, с которыми приходится встречаться на практике, приведены в табл. 2.1.

2.2. РАСЧЕТ ШУМОВ LC -ФИЛЬТРОВ

Фильтры типа LC делятся на несколько разновидностей и классов, сигнальные свойства которых в реализации на обычных пассивных элементах достаточно подробно изучены [3, 17, 20, 28, 43]. Поэтому ограничимся выводом формул для расчета шумовых показателей, выбрав из общего числа лишь наиболее типичные из них. В первую очередь, рассмотрим Т- и П-образные схемы (звенья), имея в виду, что Г-образные схемы (прямая и обратная) являются частными случаями, а более сложные структуры формируются преимущественно из ступенчатого их соединения.

Воспользовавшись шумовыми схемами замещения пассивных элементов [11] и обобщенными формулами шумовых параметров составных Т- и П-образных четырехполюсников [35], получим на их основе формулы первичных шумовых параметров для типичных фильтровых схем, которые сведены в табл. 2.2 и 2.3.

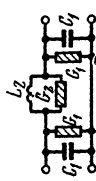
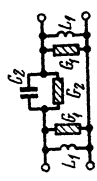


Таблица 2.1

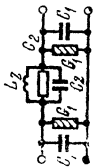
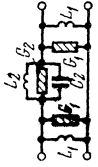
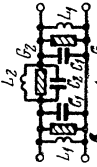
№ пп.	Преобразуемая схема	Формулы преобразования шумовых параметров двухполюсника		Преобразованная схема
		$R_{\text{ш}}=R, G_{\text{ш}}=G$	$R_{\text{ш}}>R, G_{\text{ш}}>G$	
1		$\frac{G}{G^2 + \omega^2 C^2}$	$\frac{G_{\text{ш}}}{G^2 + \omega^2 C^2}$	
2		$\frac{\omega^2 L^2 G}{\omega^2 L^2 G^2 + 1}$	$\frac{\omega^2 L^2 G_{\text{ш}}}{\omega^2 L^2 G^2 + 1}$	
3		$\frac{\omega^2 L^2 G}{\omega^2 L^2 G^2 + \rightarrow}$ $\rightarrow + (\omega^2 LC - 1)$	$\frac{\omega^2 L^2 G_{\text{ш}}}{\omega^2 C^2 G^2 + \rightarrow}$ $\rightarrow + (\omega^2 LC - 1)$	
4		$\frac{\omega^2 C^2 R}{\omega^2 C^2 R^2 + 1}$	$\frac{\omega^2 C^2 R_{\text{ш}}}{\omega^2 C^2 R^2 + 1}$	
5		$\frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2}$	$\frac{R_{\text{ш}}}{R^2 + \omega^2 L^2}$	
6		$\frac{\omega^2 C^2 R}{\omega^2 C^2 R^2 + \rightarrow}$ $\rightarrow + (\omega^2 LC - 1)$	$\frac{\omega^2 C^2 R_{\text{ш}}}{\omega^2 C^2 R^2 + \rightarrow}$ $\rightarrow + (\omega^2 LC - 1)$	
7		$\frac{G + R}{R^2 + \omega^2 L^2}$	$\frac{G_{\text{ш}} + R_{\text{ш}}}{R^2 + \omega^2 L^2}$	
8		$\frac{R + G}{G^2 + \omega^2 C^2}$	$\frac{R_{\text{ш}} + G_{\text{ш}}}{G^2 + \omega^2 C^2}$	

Первичные шумовые параметры			
№ п/п.	Схема фильтра	$R_{\text{шн}}$	$G_{\text{шн}}$
			$Z_{\text{кор}} = R_{\text{кор}} + i X_{\text{кор}}$
1			$R_1 + \frac{R_{\text{шн}} R_2}{R_{\text{шн}} + R_{\text{шн2}}} + i \left[\omega L_1 - \frac{R_{\text{шн}}}{\omega C_2 (R_{\text{шн}} + R_{\text{шн2}})} \right]$
2			$R_1 + \frac{R_{\text{шн}} R_2}{R_{\text{шн}} + R_{\text{шн2}}} - i \left(\frac{1}{\omega C_1} - \frac{\omega L_2 R_{\text{шн}}}{R_{\text{шн}} + R_{\text{шн2}}} \right)$
3		$R_{\text{шн}} \left(1 + \frac{R_{\text{шн2}}}{R_{\text{шн}} + R_{\text{шн2}}} \right)$	$R_1 + \frac{R_{\text{шн}} R_2}{R_{\text{шн}} + R_{\text{шн2}}} + i \left[\omega L_1 + \frac{\omega^2 L_2 C_2 - 1}{\omega C_2 (R_{\text{шн}} + R_{\text{шн2}})} \right]$
4		$\omega^2 C_2^2 (R_{\text{шн}} + R_{\text{шн2}}) \\ \omega^2 C_2^2 R_2^2 + (\omega^2 L_2 C_2 - 1)^2$	$R_1 + \frac{R_{\text{шн}} R_2}{R_{\text{шн}} + R_{\text{шн2}}} - i \left[\frac{1}{\omega C_1} - \frac{(\omega^2 L_2 C_2 - 1) R_{\text{шн}}}{\omega C_2 (R_{\text{шн}} + R_{\text{шн2}})} \right]$

Первичные шумовые параметры			
№ пп.	Схема фильтра	$R_{\text{шн}}$	$G_{\text{ша}}$
$Z_{\text{кор}} = R_{\text{кор}} + i X_{\text{кр}}$			
5		$R_{\text{шн}} \left(1 + \frac{R_{\text{ш2}}}{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} \right)$	$\frac{\omega^2 C_2^2 (R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}})}{\omega^2 C_2^2 R_2^2 + 1}$
6		$R_{\text{ш1}} + \frac{R_{\text{ш2}} R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$	$R_1 + \frac{R_{\text{ш1}} R_2}{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} + i \left[\frac{\omega^2 L_1 C_1 - 1}{\omega C_1} + \frac{\omega L_2 R_{\text{ш1}}}{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} \right]$
7		$R_1 + \frac{R_{\text{ш1}} R_2}{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} + i \left[\frac{\omega^2 L_1 C_1 - 1}{\omega C_1} + \frac{(\omega^2 L_2 C_2 - 1) R_{\text{ш1}}}{\omega C_2 (R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}})} \right]$	$\frac{\omega^2 C_2^2 (R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}})}{\omega^2 C_2^2 R_2^2 + (\omega^2 L_2 C_2 - 1)^2}$

Таблица 2.3

№	Схема фильтра	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шн2}$	$G_{шн1}$	$Y_{кор} = G_{кор} - i B_{кор}$
1		$\frac{\omega^2 L_2 (G_{шн1} + G_{шн2})}{\omega^2 L_2^2 G_2^2 + 1}$	$G_{шн1} \left(1 + \frac{G_{шн2}}{G_{шн1} + G_{шн2}} \right)$	$G_1 + \frac{G_{шн1} G_2}{G_{шн1} + G_{шн2}} + i \left[\omega C_1 - \frac{G_{шн1}}{\omega L_2 (G_{шн1} + G_{шн2})} \right]$
2		$\frac{G_{шн1} + G_{шн2}}{G_2^2 + \omega^2 C_2^2}$		$G_1 + \frac{G_{шн1} G_2}{G_{шн1} + G_{шн2}} - i \left(\frac{1}{\omega L_1} - \frac{\omega C_2 G_{шн1}}{G_{шн1} + G_{шн2}} \right)$
3		$\frac{\omega^2 L_2^2 (G_{шн1} + G_{шн2})}{\omega^2 L_2^2 G_2^2 + 1}$		$G_1 + \frac{G_{шн1} G_2}{G_{шн1} + G_{шн2}} + i \left[\frac{\omega^2 L_1 C_1 - 1}{\omega L_1} - \frac{G_{шн1}}{\omega L_2 (G_{шн1} + G_{шн2})} \right]$
4		$\frac{G_{шн1} + G_{шн2}}{G_2^2 + \omega^2 C_2^2}$		$G_1 + \frac{G_{шн1} G_2}{G_{шн1} + G_{шн2}} + i \left(\frac{\omega^2 C_1 L_1 - 1}{\omega L_1} + \frac{C_2 G_{шн1}}{G_{шн1} + G_{шн2}} \right)$

№ пп	Схема фильтра	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шд}$	$G_{шд}$	$Y_{кор} = G_{кор} - iB_{кор}$
5				$G_1 + \frac{G_{ш1}G_2}{G_{ш1} + G_{ш2}} + i \left[\omega C_1 + \frac{(\omega^2 L_2 C_2 - 1)G_{ш1}}{\omega L_2 (G_{ш1} + G_{ш2})} \right]$
6		$\frac{\omega^2 L_2^2 (G_{ш1} + G_{ш2})}{\omega^2 L_2^2 G_2^2 + (\omega^2 L_2^2 C_2^2 - 1)}$	$G_{ш1} \left(1 + \frac{G_{ш2}}{G_{ш1} + G_{ш2}} \right)$	$G_1 + \frac{G_{ш1}G_2}{G_{ш1} + G_{ш2}} - i \left[\frac{1}{\omega L_1} - \frac{(\omega^2 L_2 C_2 - 1)G_{ш1}}{\omega L_1 L_2 (G_{ш1} + G_{ш2})} \right]$
7				$G_1 + \frac{G_{ш1}G_2}{G_{ш1} + G_{ш2}} + i \left[\frac{(\omega^2 C_1 L_1 - 1)}{\omega L_1} + \frac{(\omega^2 L_2 C_2 - 1)G_{ш1}}{\omega L_2 (G_{ш1} + G_{ш2})} \right]$

Если фильтры выполнены на высокодобротных конденсаторах, то емкостными потерями можно пренебречь, точно так же и возникающими в них шумами. В этом случае формулы шумовых параметров фильтров принимают вид выражений табл. 2.4.

Для фильтров, состоящих из близких к идеальным элементов, в которых возможно пренебречь потерями и флуктуациями во всех составляющих $G_{шi} = G_i = 0$ и $R_{шi} = R_i = 0$, формулы первичных шумовых параметров приведены в табл. 2.5 и 2.6. Такое допущение при использовании обычных элементов возможно и в случае приближенных расчетов шумов сложных соединений.

Коэффициент шума фильтра рассчитывается по обобщенным формулам с использованием соответствующих сигнальных параметров [35].

Пример 1. Расчет шумов фильтра нижних частот.

Фильтр нижних частот (рис. 2.1) имеет следующие данные:

$$C_1 = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}, G_1 = 1,88 \cdot 10^{-6} \text{ См}, L_2 = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ Г},$$

$$R_2 = 22 \text{ Ом}, R_{ш1} = R_{ш2} = 600 \text{ Ом}.$$

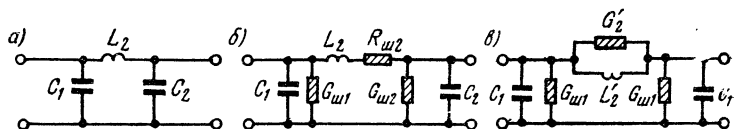


Рис. 2.1. Фильтр нижних частот (а), шумовая схема замещения (б), с приведенным продольным звеном (в)

Требуется рассчитать коэффициент шума фильтра на средней частоте $f_0 = 1000$ Гц при использовании обычной катушки $R_{ш2} = 22$ Ом и замене ее гираторной индуктивностью с $R_{ш2} = 220$ Ом.

В табл. 2.3 находим схему фильтра, отличающуюся от заданной параллельным соединением индуктивности и шумовой проводимости в продольном звене. Поэтому первоначально приведем заданную схему к известной, воспользовавшись для шумовых величин табл. 2.1 (ф-лы 5).

Фильтр с обычными элементами

$$G_{ш2} = \frac{R_{ш2}}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} = \frac{22}{22^2 + (2 \cdot 3,14 \cdot 10^3)^2 (6,3 \cdot 10^{-3})^2} = 1,07 \cdot 10^{-2} \text{ См}.$$

Для определения первичных шумовых параметров воспользуемся табл. 2.3 (схема 1):

$$R_{шa} = \frac{G_{ш1} + G_{ш2}}{|Y_2|^2} = \frac{1,88 \cdot 10^{-6} + 1,07 \cdot 10^{-2}}{|1,07 \cdot 10^{-2} - i 19,31 \cdot 10^{-3}|^2} = 22,004 \text{ Ом},$$

Таблица 2.4

№ п/п	Схема фильтра	Первичные шумовые параметры		
		$R_{\text{шн}}(G_{\text{шд}})$	$G_{\text{шд}}(G_{\text{шн}})$	$Z_{\text{нор}}(Y_{\text{нор}})$
1		$R_{\text{шн}}$	$\omega^2 C_2^2 R_{\text{шн}}$	$R_1 + i \left(\frac{\omega^3 L_1 C_2 - 1}{\omega C_2} \right)$
2				$R_1 + i \left(\omega L_1 - \frac{C_1 + C_2}{\omega C_1 C_2} \right)$
3		—	$\frac{R_{\text{шн}2}}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$	$-i \frac{1}{\omega C_1}$
4		—	$\frac{\omega^2 C_2^2 R_{\text{шн}2}}{\omega^2 C_2^2 R_2^2 + (\omega^2 L_2 C_2 - 1)^2}$	
5		$R'_{\text{шн}1}$	$\omega^2 C_2'^2 R'_{\text{шн}1}$	$R'_{\text{шн}1} + i \frac{\omega^2 L_1' C_1' C_2 - (C_1' + C_2)}{\omega C_1' C_2}$

Окончание табл. 2.4

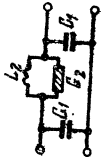
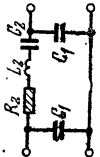
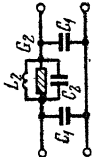
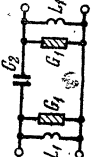
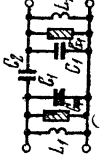
Ш №	Схема фильтра	Первичные шумовые параметры		
		$R_{\text{шн}}(G_{\text{шд}})$	$G_{\text{шд}}(G_{\text{шн}})$	$Z_{\text{кор}}(Y_{\text{кор}})$
6		$\frac{\omega^2 L_2^2 G_{\text{шд}}}{\omega^2 L_2^2 G_2^2 + 1}$	—	
7		$\frac{\omega L_2' G_{\text{шд}}}{\omega^2 L_2'^2 G_2'^2 + (\omega L_2' C_2' - 1)^2}$	—	$i \omega C_1$
8		$\frac{\omega L_2 G_{\text{шд}}}{\omega^2 L_2^2 G_2^2 + (\omega L_2 C_2 - 1)^2}$	—	
9		$\frac{G_{\text{шд}}}{\omega^2 C_2^2}$	$G_{\text{шд}}$	$G_1 + i \frac{\omega^2 L_1 C_2 - 1}{\omega L_1}$
10				$G_1 + i \frac{\omega^2 L_1 (C_1 + C_2) - 1}{\omega L_1}$

Таблица 2.5

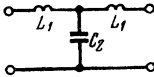
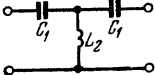
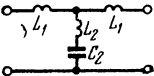
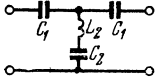
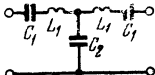
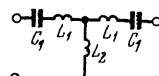
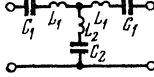
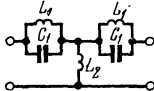
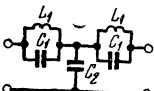
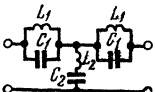
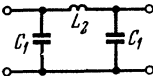
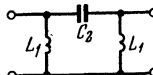
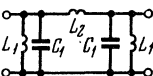
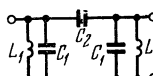
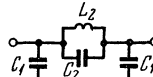
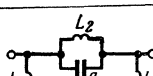

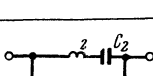
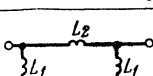
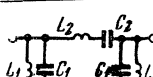
№ пп.	Схема фильтра	Первичные шумовые параметры
		$Z_{\text{кор}}$
1		$i \frac{\omega^2 L_1 C_2 - 1}{\omega C_2}$
2		$i \frac{\omega^2 L_2 C_1 - 1}{\omega C_1}$
3		$i \frac{\omega^2 (L_1 + L_2) C_2}{\omega C_2}$
4		$i \frac{\omega^2 L_2 C_1 C_2 - (C_1 + C_2)}{\omega C_1 C_2}$
5		$i \frac{\omega^2 L_1 C_1 C_2 - (C_1 + C_2)}{\omega C_1 C_2}$
6		$i \frac{\omega^2 (L_1 + L_2) C_1 - 1}{\omega C_1}$
7		$i \frac{\omega^2 (L_1 + L_2) C_1 C_2 - (C_1 + C_2)}{\omega C_1 C_2}$
8		$i \frac{\omega [(\omega^2 L_1 C_1 - 1) L_2 - L_1]}{\omega^2 L_1 C_1 - 1}$
9		$-i \frac{\omega^2 L_1 C_2 - (\omega^2 L_1 C_1 - 1)}{(\omega^2 L_1 C_1 - 1) \omega C_2}$
10		$i \frac{(\omega^2 L_1 C_1 - 1)(\omega^2 L_2 C_2 - 1) - \omega^2 L_1 C_2}{(\omega^2 L_1 C_1 - 1) \omega C_2}$

Таблица 2.6

№ ш.	Схема фильтра	Первичные шумовые параметры	
		$Y_{\text{нор}}$	
1		$i \frac{\omega^2 L_2 C_1 - 1}{\omega L_2}$	
2		$i \frac{\omega^2 L_1 C_2 - 1}{\omega L_1}$	
3		$i \frac{\omega^2 L_1 L_2 C_1 - (L_1 + L_2)}{\omega L_1 L_2}$	
4		$i \frac{\omega^2 L_1 (C_1 + C_2) - 1}{\omega L_1}$	
5		$i \frac{\omega^2 L_2 (C_1 + C_2) - 1}{\omega L_2}$	
6		$i \frac{\omega^2 L_1 L_2 C_2 - (L_1 + L_2)}{\omega L_1 L_2}$	
7		$i \frac{\omega^2 L_1 L_2 (C_1 + C_2) - (L_1 + L_2)}{\omega L_1 L_2}$	
8		$i \frac{(\omega^2 L_2 C_2 - 1) \omega C_1 - \omega C_2}{\omega^2 L_2 C_2 - 1}$	
9		$-i \frac{\omega^2 L_2 C_1 - (\omega^2 L_1 C_1 - 1)}{(\omega^2 L_1 C_1 - 1) \omega L_2}$	
10		$i \frac{(\omega^2 L_2 C_2 - 1) (\omega^2 L_1 C_1 - 1) - \omega^2 L_1 C_2}{(\omega^2 L_1 C_1 - 1) \omega L_2}$	

$$G_{\text{шн}} = G_{\text{ш1}} \left(1 + \frac{G_{\text{ш2}}}{G_{\text{ш1}} + G_{\text{ш2}}} \right) = 1,88 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{1,07 \cdot 10^{-2}}{1,88 \cdot 10^{-6} + 1,07 \cdot 10^{-2}} \right) = 3,76 \cdot 10^{-6} \text{ См},$$

$$Y_{\text{кор}} = Y_1 + Y_2 \frac{G_{\text{ш1}}}{G_{\text{ш1}} + G_{\text{ш2}}} = 1,88 \cdot 10^{-6} + i 0,126 \cdot 10^{-3} + (1,07 \cdot 10^{-2} - i 19,31 \cdot 10^{-3}) \frac{1,88 \cdot 10^{-6}}{1,88 \cdot 10^{-6} + 1,07 \cdot 10^{-2}} = 3,76 \cdot 10^{-6} + i 0,122 \cdot 10^{-3} \text{ См}.$$

Далее рассчитаем коэффициент шума фильтра, предварительно определив параметры:

$$a_{11} = 1 + Z_2 Y_3 = 1 + (22,0 + i 2 \cdot 3,14 \cdot 10^3 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3}) \times (1,88 \cdot 10^{-6} + i 0,126 \cdot 10^{-3}) = 0,995 + i 0,283 \cdot 10^{-2}; a_{21} = Y_1 + Y_3 + Y_1 Z_2 Y_3 = (1,88 \cdot 10^{-6} + i 0,126 \cdot 10^{-3}) 2 + (1,88 \cdot 10^{-6} + i 0,126 \cdot 10^{-3})^2 \times (22 + i 2 \cdot 3,14 \cdot 10^3 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3}) = 3,14 \cdot 10^{-6} + i 250,6 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

— с учетом шумов нагрузки

$$F = \frac{1}{G_{\text{н1}}} (G_{\text{шн}} + R_{\text{ш а}} |Y_{\text{н1}} + Y_{\text{кор}}|^2 + G_{\text{шн2}} |Z_{\text{н2}}|^2 |a_{21} + Y_{\text{н1}} a_{11}|^2) + 1 = 600 [3,76 \cdot 10^{-6} + 22,004 |0,166 \cdot 10^{-2} + 3,76 \cdot 10^{-6} + i 0,122 \times 10^{-3}|^2 + 0,166 \cdot 10^{-2} 600^2 |3,4 \cdot 10^{-6} + i 250,6 \cdot 10^{-6} + 0,166 \cdot 10^{-2} (0,995 + i 0,283 \cdot 10^{-2})|^2] + 1 = 2,063;$$

— без учета шумов нагрузки

$$F = 600 (3,76 \cdot 10^{-6} + 22,004 |0,166 \cdot 10^{-2} + 3,76 \cdot 10^{-6} + i 0,122 \cdot 10^{-3}|^2) = 1,039.$$

Фильтр с гираторной индуктивностью.

Используя исходные формулы и учитывая $R_{\text{ш2}} = 220 \text{ Ом}$, определим шумовые параметры:

$$R_{\text{ш а}} = \frac{1,88 \cdot 10^{-6} + 10,7 \cdot 10^{-2}}{|1,07 \cdot 10^{-2} - i 19,31 \cdot 10^{-3}|^2} = 220,004 \text{ Ом},$$

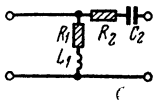
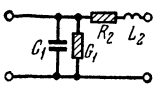
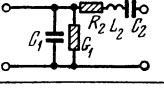
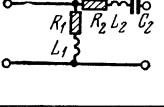
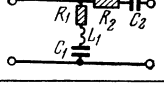
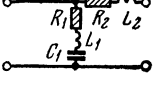
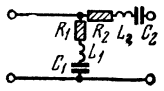
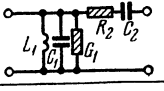
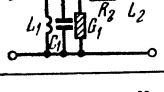
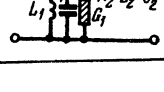
$$G_{\text{шн}} = 1,88 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{10,7 \cdot 10^{-2}}{1,88 \cdot 10^{-6} + 10,7 \cdot 10^{-2}} \right) = 3,76 \cdot 10^{-6} \text{ См},$$

$$Y_{\text{кор}} = 1,88 \cdot 10^{-6} + i 0,126 \cdot 10^{-3} + (1,07 \cdot 10^{-2} - i 19,31 \cdot 10^{-3}) \times \frac{1,88 \cdot 10^{-6}}{1,88 \cdot 10^{-6} + 10,7 \cdot 10^{-2}} = 3,76 \cdot 10^{-6} + i 0,125 \cdot 10^{-3} \text{ См}.$$

Таблица 2.7

№ пп.	Схема корректора	Первичные шумовые параметры		
		$R_{\text{шн}}$	$G_{\text{ша}}$	$Z_{\text{нор}}$
1		$R_{\text{шн1}}$	$\frac{R_{\text{ш2}}}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$	$R_1 - i \frac{1}{\omega C_1}$
2			$G_{\text{ш2}}$	$R_1 + i \omega L_1$
3				$R_1 + i \frac{\omega^2 L_1 C_1 - 1}{\omega C_1}$
4			$\frac{R_{\text{ш2}}}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$	
5			$\omega^2 R_{\text{ш2}}^2 C_2^2$ $\omega^2 R_2^2 C_2^2 + (\omega^2 L_2 C_2 - 1)^2$	$R_1 - i \frac{1}{\omega C_1}$
6				$R_1 + i \omega L_1$
7				$R_1 + i \frac{\omega^2 L_1 C_1 - 1}{\omega C_1}$
8			$G_{\text{ш2}}$	$R_1 - i \frac{1}{\omega C_1}$
9				$R_1 + i \omega L_1$
10				$R_1 + i \frac{\omega^2 L_1 C_1 - 1}{\omega C_1}$

Таблица 2.8

№ ш.	Схема корректора	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шз}$	$G_{шн}$	$Y_{кор}$
1		$R_{шз2}$	$\frac{R_{шн}}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}$	$\frac{R_1}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} - i \frac{\omega L_1}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}$
2			$G_{шн}$	$G_1 + i \omega C_1$
3				
4			$\frac{R_{шн}}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}$	$\frac{R_1}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} - i \frac{\omega L_1}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}$
5				
6			$\frac{\omega^2 C_1^2 R_{шн}}{\omega^2 C_1^2 R_1^2 + \rightarrow}$	$\frac{\omega^2 C_1^2 R_1^2 \rightarrow}{\omega^2 C_1^2 R_1^2 + \rightarrow} \rightarrow i \omega C_1 (\omega^2 L_1 C_1 - 1) \rightarrow + (\omega^2 L_1 C_1 - 1)^2$
7				
8				
9			$G_{шн}$	$G_1 + i \frac{\omega^2 L_1 C_1 - 1}{\omega L_1}$
10				

Полученные величины найдем:

— с учетом шумов нагрузки

$$F = 600 [3,76 \cdot 10^{-6} + 220,004 | 166 \cdot 10^{-2} + 3,76 \cdot 10^{-6} + \\ + i 0,125 \cdot 10^{-3} |^2 + 0,166 \cdot 10^{-2} \cdot 600^2 | 3,4 \cdot 10^{-6} + i 250,6 \cdot 10^{-6} + \\ + 0,166 \cdot 10^{-2} (0,995 + i 0,283 \cdot 10^{-2}) |^2] + 1 = 2,396;$$

— без учета шумов нагрузки

$$F = 600 (3,76 \cdot 10^{-6} + 220,004 | 0,166 \cdot 10^{-2} + 3,76 \cdot 10^{-6} + \\ + i 0,125 \cdot 10^{-3} |^2) = 1,374.$$

Как видно из рассмотренных примеров, флуктуации гираторной индуктивности повышают коэффициент шума. Еще в большей степени он возрастет, если заменить полупроводниковыми аналогами и конденсаторы.

2.3. РАСЧЕТ ШУМОВ *RLC*-КОРРЕКТОРОВ

Расчет шумовых показателей различного назначения корректоров, содержащих пассивные элементы, принципиально не отличается от изложенного выше. Наличие в корректорах резисторов позволяет отнести к ним потери и шумы реактивных элементов. При расчете также оказываются полезными шумовые схемы замещения и формулы преобразования шумовых параметров двухполюсников (табл. 2.1).

Наиболее распространены схемы корректоров Г-образная и обратная ей, Т-образная и ее модификации, мостовая [3, 23, 38, 43]. Используя формулы первичных шумовых параметров обобщенных схем [35], можно рассчитать шумовые показатели любых корректоров этого вида. В табл. 2.7 и 2.8 приведены шумовые параметры корректоров первого вида, несложно получение их и для других схем.

Шумовые параметры многозвенных корректоров находятся по формулам сложных соединений шумящих четырехполюсников. Порядок расчета ничем не отличается от изложенного — вначале определяются шумовые параметры отдельных звеньев, а затем находятся результирующие шумовые величины. Коэффициент шума рассчитывается в зависимости от условий задачи.

Пример 2. Расчет шумов амплитудно-частотного корректора.

Корректор амплитудно-частотных искажений (рис. 2.2) имеет следующие данные: $C_1 = 60 \cdot 10^{-9}$ Ф, $R_1 = 480$ Ом, $R_2 = 150$ Ом, $L_1 = 21,5 \cdot 10^{-3}$ Г, $R_{H1} = R_{H2} = 600$ Ом. Требуется рассчитать коэффициент шума на верхней частоте рабочего диапазона $f_v = 8000$ Гц.

Образующие корректор реактивные элементы C_1 и L_1 обладают потерями, которые в общем случае учитываются согласно [11, 35]. Если C_1 и L_1 имеют высокую добротность, потерями их пренебрежем, учитывая $G_1 \gg G_{\text{шс}}$ и $R_2 \gg R_{\text{пл}}$. В табл. 2.7 (ф-лы 5) находим схему корректора, отличающуюся от рассматриваемой последовательным соединением сопротивления и конденсатора в продольном плече. Поэтому вначале приведем заданную схему к известной, воспользовавшись для определения шумовых величин табл. 2.1:

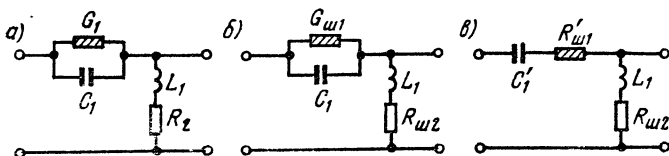


Рис. 2.2. Амплитудно-частотный корректор (а), шумовая схема замещения (б), с приведенным продольным звеном (в)

$$R'_{\text{ш1}} = \frac{G_{\text{ш1}}}{G_1^2 + \omega^2 C_1^2} = \frac{2,08 \cdot 10^{-3}}{(2,08 \cdot 10^{-3})^2 + (2,3,14 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^{-9})^2} =$$

$$= 154,99 \text{ Ом},$$

$$Z'_1 = \frac{G_1}{G_1^2 + \omega^2 C_1^2} - i \frac{\omega C_1}{G_1^2 + \omega^2 C_1^2} =$$

$$= \frac{2,08 \cdot 10^{-3}}{(2,08 \cdot 10^{-3})^2 + (2,3,14 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^{-9})^2} -$$

$$- i \frac{2,3,14 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^{-9}}{(2,08 \cdot 10^{-3})^2 + (2,3,14 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 60 \cdot 10^{-9})^2} = 154,99 - i 224,59 \text{ Ом}.$$

Первичные шумовые параметры определим из табл. 2.7 (ф-лы 1):

$$R_{\text{шн}} = R'_{\text{ш1}} = 154,99 \text{ Ом},$$

$$G_{\text{ш а}} = \frac{R_{\text{ш2}}}{|Z_2|^2} = \frac{150}{|150 + i 2,3,14 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 21,5 \cdot 10^{-3}|^2} =$$

$$= 0,126 \cdot 10^{-3} \text{ См},$$

$$Z_{\text{кор}} = Z_1 = 154,99 - i 224,59.$$

Коэффициент шума корректора определим, предварительно рассчитав сигнальные параметры:

$$a_{11} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{154,99 - i 224,59}{150 + i 1080,16} = 0,82 - i 0,169;$$

$$a_{21} = \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{150 + i 1080,16} = (0,126 - i 0,908) \cdot 10^{-3} \text{ См}.$$

— с учетом шумов нагрузки

$$F = \frac{1}{R_{н1}} (R_{шн} + G_{ш а} |Z_{н1} + Z_{кор}|^2 + R_{н2} |a_{21}Z_{н1} + a_{11}|^2) + 1 =$$

$$= \frac{1}{600} [154,99 + 0,126 \cdot 10^{-3} |600 + 154,99 - i 224,59|^2 +$$

$$+ 600 |(0,126 - i 0,908) \cdot 10^{-3} \cdot 600 + 0,82 - i 0,169|^2] + 1 = 2,7.$$

— без учета шумов нагрузки

$$F = \frac{1}{R_{н1}} (R_{шн} + G_{ш а} |Z_{н1} + Z_{кор}|^2) = \frac{1}{600} (154,99 + 0,126 \cdot 10^{-3} | \times$$

$$\times |600 + 154,99 - i 224,59|^2) + 1 = 1,39.$$

Подобным же образом рассчитывается коэффициент шума корректора на других частотах. Коэффициент шума корректора зависит от частоты, он заметно возрастает с повышением затухания. Для сравнения приведем коэффициент шума на частоте 300 Гц, который с учетом шумов нагрузки составляет величину 76,24 и без учета их — 13,89.

2.4. РАСЧЕТ ШУМОВ *RC*-ЦЕПЕЙ

С развитием микроэлектроники *RC*-цепи получили исключительно широкое применение. В значительной мере это вызвано практически нереализуемостью методами интегральной микротехнологии высокочастотных катушек и трансформаторов. Функциональные свойства тех и других во многих случаях воспроизводятся *RC*-цепями в сочетании с активными элементами [16, 30, 32]. Они технологически совместимы с активными микроэлементами, особенно при выполнении на полупроводниковых аналогах. На базе *RC*-цепей и активных элементов осуществляются фильтровые и корректирующие устройства, они используются для межкаскадных соединений и в цепях обратных связей и т. д. Разработанная выше методика и обобщенные формулы [35] упрощают определение первичных шумовых параметров наиболее употребительных *RC*-цепей.

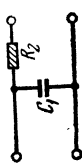
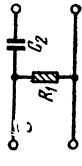
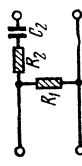
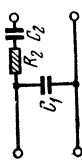
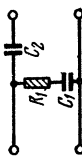
Полученные таким образом первичные шумовые параметры для четырехполюсников, наиболее часто используемых в цепях с лампами, транзисторами, операционными усилителями, представлены в табл. 2.9—2.12.

Подобно предыдущему находятся шумовые параметры *RC*-цепей более сложной структуры и рассчитывается коэффициент шума с учетом шумов нагрузки и без них.

Таблица 2.9

№ пп.	Схема RC-цепи	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шн}$	$G_{ша}$	$Z_{кор}$
1		$R_{ш1}$	—	$R_1 - i \frac{1}{\omega C_2}$
2		—	$\frac{R_{ш2}}{R_2^2}$	$-i \frac{1}{\omega C_1}$
3		$R_{ш1}$		$R_1 - i \frac{1}{\omega C_1}$
4		—	$R_1 - i \frac{C_1 + C_2}{\omega C_1 C_2}$	
5		—	$\frac{\omega^2 C_2^2 R_{ш2}}{\omega^2 C_2^2 R_2^2 + 1}$	$-i \frac{1}{\omega C_1}$
6		$R_{ш1}$		R_1
7				$R_1 - i \frac{1}{\omega C_1}$
8		—	$G_{ш2}$	$-i \frac{1}{\omega C_1}$
9		$R_{ш1}$		R_1
10				$R_1 - i \frac{1}{\omega C_1}$

Таблица 2.10

№ шт.	Схема RC-цепи	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шз}$	$G_{шн}$	$Y_{кор}$
1		$R_{шз}$	—	$i \omega C_1$
2		—	$G_{шн}$	$G_1 + i \omega C_2$
3		$R_{шз}$	$R_{шн} \frac{R_1^2}{R_1^2}$	$\frac{1}{R_1}$
4			—	$i \omega C_1$
5		—	$\frac{\omega^2 C_1^2 R_{шн}}{\omega^2 C_1^2 R_1^2 + 1}$	$\frac{\omega^2 C_1^2 R_1}{\omega^2 C_1^2 R_1^2 + 1} + i \left(\frac{\omega C_1}{\omega^2 C_1^2 R_1^2 + 1} + \omega C_2 \right)$

Продолжение табл. 2.10

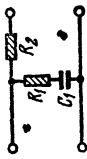
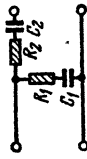

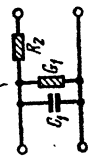
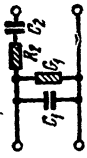
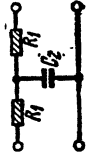
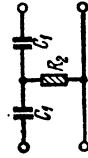
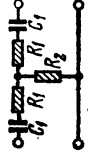
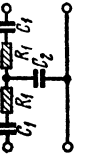
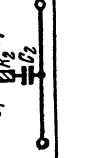
№ п.	Схема RC-цепи	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шз}$	$G_{шн}$	$Y_{кор}$
6		$R_{шз}$	$\frac{\omega^3 C_1^2 R_{шн}}{\omega^3 C_1^2 R_1^2 + 1}$	$\frac{\omega^2 C_1^2 R_1}{\omega^3 C_1^2 R_1^2 + 1} + \frac{\omega C_1}{\omega^3 C_1^2 R_1^2 + 1}$
7		$R_{шз}$	$G_{шн}$	$G_{шн}$
8		—	$G_{шн}$	$G_1 + i \omega (C_1 + C_2)$
9		$R_{шз}$	$G_{шн}$	$G_1 + i \omega C_1$
10		$R_{шз}$	$G_{шн}$	$G_1 + i \omega C_1$

Таблица 2.11

№ ш.	Схема RC-цепи	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шн}$	$G_{шз}$	$Z_{кор}$
1		$R_{шн}$	$\omega^2 C_2^2 R_{шн}$	$R_1 - i \frac{1}{\omega C_2}$
2		—	$\frac{R_{шз}}{R_2^2}$	$-i \frac{1}{\omega C_1}$
3		$R_{шн} \left(1 + \frac{R_{шз}}{R_{шн} + R_{шз}} \right)$	$\frac{R_{шн} + R_{шз}}{R_2^2}$	$R_1 + \frac{R_2 R_{шн}}{R_{шн} + R_{шз}} - i \frac{1}{\omega C_1}$
4		$R_{шн}$	$\omega^2 C_2^2 R_{шн}$	$R_1 - i \frac{C_1 + C_2}{\omega C_1 C_2}$
5		—	$\frac{\omega^2 C_2^2 R_{шз}}{\omega^2 C_2^2 R_2^2 + 1}$	$-i \frac{1}{\omega C_1}$

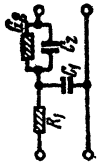




Окончание табл. 2.11

№ пп.	Схема RC-цепи	Первичные шумовые параметры		
		$R_{ш1}$	$G_{ш2}$	$Z_{кор}$
6		$R_{ш1} \left(1 + \frac{R_{ш2}}{R_{ш1} + R_{ш2}} \right)$	$\frac{\omega^2 C_2^2 (R_{ш1} + R_{ш2})}{\omega^2 C_2^2 R_2^2 + 1}$	$R_1 + \frac{R_{ш1} R_2}{R_{ш1} + R_{ш2}} - i \frac{R_{ш1}}{\omega C_2 (R_{ш1} + R_{ш2})}$
7		—	—	$R_1 + \frac{R_{ш1} R_2}{R_{ш1} + R_{ш2}} - i \left[\frac{1}{\omega C_1} + \frac{R_{ш1}}{\omega C_2 (R_{ш1} + R_{ш2})} \right]$
8		—	$G_{ш2}$	$-i \frac{1}{\omega C_1}$
9		$R_{ш1} \left[1 + \frac{G_{ш2}}{R_{ш1} (G_{ш2}^2 + \omega^2 C_2^2) + G_{ш2}} \right]$	$R_{ш1} (G_2^2 + \omega^2 C_2^2) + G_{ш2}$	$R_1 + \frac{(G_2 - i \omega C_2) R_{ш1}}{R_{ш1} (G_2^2 + \omega^2 C_2^2) + G_{ш2}}$
10		—	—	—

Таблица 2.12

№ ш.	Схема RC-цепи	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шн}$	$G_{шн}$	$Z_{кор}$
1		$R_{ш}$	—	R
2		—	—	$-i \frac{1}{\omega C}$
3		—	$\frac{\omega^2 C^2 R_{ш}}{\omega^2 C^2 R^2 + 1}$	—
4		$R_{ш}$	—	$R - i \frac{1}{\omega C}$
5		—	$\frac{R_{ш}}{R^2}$	$-i \frac{1}{\omega C_1}$
6		$R_{ш1} + \frac{R_{ш2} R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}}$	$\frac{(R_{ш2} + R_{ш3}) \omega^2 C^2}{\omega^2 C^2 R^2 + 1}$	$R_1 + \frac{R_2 R_{ш3}}{R_{ш2} + R_{ш3}} - i \frac{R_{ш3}}{\omega C (R_{ш2} + R_{ш3})}$

Окончание табл. 2.12

№ пп.	Схема RC-цепи	Первичные шумовые параметры		
		$R_{шн}$	$G_{шн}$	$Z_{кор}$
7		$R_{шн}$	$\frac{\omega^3 C_1^2 G_{шн}}{G_2^2 + \omega^2 C_2^2}$	$R_1 - i \frac{1}{\omega C}$
8			$\frac{\omega^3 C_2^2 R_{шн}}{\omega^2 C_2^2 R_2^2 + 1}$	R_1
9			$\omega^3 C_1^2 R_{шн}$	$R_1 - i \frac{1}{\omega C_1}$
10		$\frac{R_{шн} R_{шн2}}{R_{шн1} + R_{шн2}}$	$\frac{R_{шн1} + R_{шн2}}{R_1^2}$	$\frac{R_1 R_{шн2}}{R_{шн1} + R_{шн2}} - i \frac{1}{\omega C_1}$
11		—	$\frac{\omega^3 C_2^2 R_{шн}}{\omega^3 C_2^2 R^2 + 1}$	$-i \frac{1}{\omega C_1}$

РАСЧЕТ ШУМОВ АКТИВНЫХ ЦЕПЕЙ

3.1. РАСЧЕТ ШУМОВ ТРАНЗИСТОРНЫХ RC -ЦЕПЕЙ

Выражение шумовых свойств активных и пассивных четырехполюсников на принципиально единой основе позволяет создать обобщенный метод расчета шумов и минимизации коэффициента шума их соединений [35, 36]. Пассивные четырехполюсники могут содержать любые элементы, но, учитывая тенденции развития микроэлектроники, целесообразно ориентироваться на RC -цепи.

Используя шумовые параметры транзисторов и пассивных RC -цепей, определим шумовые показатели основных видов соединений. Для этого воспользуемся зависимостями между h -параметрами, в которых преимущественно выражаются сигнальные свойства транзисторов, и параметрами других систем, а также между последними и сигнальными показателями RC -цепей, выражаемыми обычно в z - и y -параметрах. Выполнив соответствующие подстановки и выкладки, получим шумовые параметры основных видов соединений, сведенные в табл. 3.1.

Для пояснения предлагаемого метода рассчитаем шумовые показатели наиболее часто встречающихся на практике транзисторных RC -цепей.

Транзистор с ООС последовательного типа. При включении сопротивления $Z(Y)$ между эмиттером и общим выводом (рис. 3.1а) возникает частотнозависимая

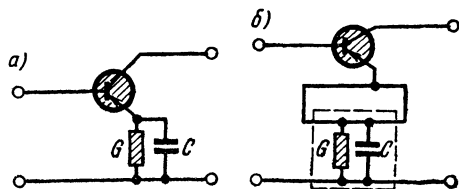
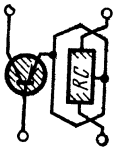

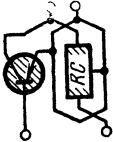
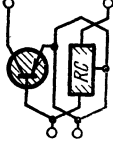



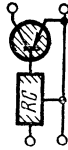
Рис. 3.1. Транзистор с ООС по току (а), представленный в виде последовательного соединения с пассивным четырехполюсником (б)

Таблица 3.1

Тип цепи	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
$U - U$		$G_{\text{шa}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} ^2 + G_{\text{шa}}^{(n)} h_{22} z_{21} ^2}{ h_{21} - h_{22} z_{21} ^2}$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(a)} + R_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{G_{\text{шa}}^{(a)} G_{\text{шa}}^{(n)} [(Z_{\text{кор}}^{(a)} h_{22} - \Delta h) z_{21} + (Z_{\text{кор}}^{(n)} - z_{11}) h_{21}]^2}{G_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} ^2 + G_{\text{шa}}^{(n)} h_{22} z_{21} ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_{\text{кор}}^{(a)} + Z_{\text{кор}}^{(n)} - \frac{(G_{\text{шa}}^{(a)} h_{21}^* + G_{\text{шa}}^{(n)} h_{22}^* z_{21}) [(Z_{\text{кор}}^{(a)} h_{22} - \Delta h) z_{21} + (Z_{\text{кор}}^{(n)} - z_{11}) h_{21}]}{G_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} ^2 + G_{\text{шa}}^{(n)} h_{22} z_{21} ^2}$
		$R_{\text{шa}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} ^2 + R_{\text{шa}}^{(a)} h_{11} y_{21} ^2}{ h_{21} + h_{11} y_{21} ^2}$
$I - I$		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(a)} + G_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{R_{\text{шa}}^{(a)} R_{\text{шa}}^{(n)} [(Y_{\text{кор}}^{(a)} h_{11} - 1) y_{21} - (Y_{\text{кор}}^{(n)} - y_{11}) h_{21}]^2}{R_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} ^2 + R_{\text{шa}}^{(n)} h_{11} y_{21} ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_{\text{кор}}^{(a)} + Y_{\text{кор}}^{(n)} + \frac{(R_{\text{шa}}^{(a)} h_{21}^* - R_{\text{шa}}^{(n)} h_{21}^* y_{21}) [(Y_{\text{кор}}^{(a)} h_{11} - 1) y_{21} - (Y_{\text{кор}}^{(n)} - y_{11}) h_{21}]}{R_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} ^2 + R_{\text{шa}}^{(n)} h_{11} y_{21} ^2}$

Продолжение табл. 3.1

Тип цепи	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
U — I		$G_{\text{шa}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} z_{22} ^2 + G_{\text{шa}}^{(n)} z_{21} ^2}{ z_{21} - h_{21} z_{22} ^2}$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(a)} + R_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{G_{\text{шa}}^{(a)} G_{\text{шa}}^{(n)} (Z_{\text{кор}}^{(a)} - h_{11}) z_{21} + (Z_{\text{кор}}^{(n)} z_{22} - \Delta z) h_{21} ^2}{G_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} z_{22} ^2 + G_{\text{шa}}^{(n)} z_{21} ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_{\text{кор}}^{(a)} + Z_{\text{кор}}^{(n)} - \frac{(G_{\text{шa}}^{(a)} h_{21}^* z_{22} + G_{\text{шa}}^{(n)} z_{21}^*) [(Z_{\text{кор}}^{(a)} - h_{11}) z_{21} + (Z_{\text{кор}}^{(n)} z_{22} - \Delta z) h_{21}]}{G_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} z_{22} ^2 + G_{\text{шa}}^{(n)} z_{21} ^2}$
I — U		$R_{\text{шa}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} y_{22} ^2 + R_{\text{шa}}^{(n)} \Delta h y_{21} ^2}{ h_{21} y_{22} - \Delta h y_{21} ^2}$
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(a)} + G_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{R_{\text{шa}}^{(a)} R_{\text{шa}}^{(n)} (Y_{\text{кор}}^{(a)} \Delta h - h_{22}) y_{21} - (Y_{\text{кор}}^{(n)} y_{22} - \Delta y) h_{21} ^2}{R_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} y_{22} ^2 + R_{\text{шa}}^{(n)} \Delta h y_{21} ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_{\text{кор}}^{(a)} + Y_{\text{кор}}^{(n)} - \frac{(R_{\text{шa}}^{(a)} h_{21}^* y_{22} + R_{\text{шa}}^{(n)} \Delta h^* y_{21}) [(Y_{\text{кор}}^{(a)} \Delta h - h_{22}) y_{21} - (Y_{\text{кор}}^{(n)} y_{22} - \Delta y) h_{21}]}{R_{\text{шa}}^{(a)} h_{21} y_{22} ^2 + R_{\text{шa}}^{(n)} \Delta h y_{21} ^2}$

Тип цепи	Схема соединения	Пара-метр	Формулы результирующих шумовых параметров
АП		$G_{\text{шд}}^{(p)}$	$G_{\text{шд}}^{(a)} + (R_{\text{шн}}^{(n)} h_{22} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} Z_{\text{кор}}^{(n)} h_{22} - 1 ^2) h_{21} ^{-2}$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(a)} + \frac{G_{\text{шд}}^{(a)} R_{\text{шн}}^{(n)} Z_{\text{кор}}^{(a)} h_{22} - \Delta h ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} R_{\text{шн}}^{(n)} h_{12} ^2 + G_{\text{шд}}^{(a)} G_{\text{шд}}^{(n)} \times \rightarrow}{G_{\text{шд}}^{(a)} h_{21} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} Z_{\text{кор}}^{(n)} h_{22} - 1 ^2 + R_{\text{шн}}^{(n)} h_{22} ^2} \rightarrow$ $\rightarrow \times (Z_{\text{кор}}^{(n)} \Delta h - h_{11}) - (Z_{\text{кор}}^{(n)} h_{22} - 1) Z_{\text{кор}}^{(a)} ^2$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(n)} h_{22}^* (Z_{\text{кор}}^{(a)} h_{22} - \Delta h) + G_{\text{шд}}^{(n)} (Z_{\text{кор}}^{(n)} h_{22} - 1) [Z_{\text{кор}}^{(n)} \Delta h - h_{11}] - (Z_{\text{кор}}^{(n)} h_{22} - 1) Z_{\text{кор}}^{(a)}$ $G_{\text{шд}}^{(a)} h_{21} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} Z_{\text{кор}}^{(n)} h_{22} - 1 ^2 + R_{\text{шн}}^{(n)} h_{22} ^2$
ПА		$R_{\text{шд}}^{(p)}$	$R_{\text{шд}}^{(a)} + (G_{\text{шн}}^{(a)} + R_{\text{шд}}^{(a)} Y_{\text{кор}}^{(a)} - y_{22} ^2) y_{21} ^{-2}$
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шд}}^{(n)} G_{\text{шн}}^{(a)} Y_{\text{кор}}^{(n)} - y_{11} ^2 + R_{\text{шд}}^{(a)} G_{\text{шн}}^{(a)} y_{12} ^2 + R_{\text{шд}}^{(n)} R_{\text{шд}}^{(a)} (Y_{\text{кор}}^{(a)} y_{11} - \Delta y) \rightarrow$ $R_{\text{шд}}^{(a)} y_{21} ^2 + R_{\text{шд}}^{(a)} Y_{\text{кор}}^{(a)} - y_{22} ^2 + G_{\text{шн}}^{(a)}$ $\rightarrow - (Y_{\text{кор}}^{(a)} - y_{22}) Y_{\text{кор}}^{(n)} ^2$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(a)} (Y_{\text{кор}}^{(n)} - y_{11}) + R_{\text{шд}}^{(a)} (Y_{\text{кор}}^{(a)*} - y_{22})^* [(Y_{\text{кор}}^{(a)} y_{11} - \Delta y) - (Y_{\text{кор}}^{(a)} - y_{22}) Y_{\text{кор}}^{(n)}]$ $R_{\text{шд}}^{(n)} y_{21} ^2 + R_{\text{шд}}^{(a)} Y_{\text{кор}}^{(a)} - y_{22} ^2 + G_{\text{шн}}^{(a)}$

отрицательная обратная связь по току. Шумовые свойства транзистора с такой обратной связью легко рассчитать, представив соединение результирующим четырехполюсником, образованным последовательно включенным транзистором и пассивным четырехполюсником (показан табл. 3.1, группа $U-U$, определим первичные шумовые параметры

$$R_{\text{шн}}^{(a)} = R_{\text{шн } \varnothing}, \quad G_{\text{ш } a}^{(a)} = G_{\text{ш } a \varnothing}, \quad Z_{\text{кор}}^{(a)} = Z_{\text{кор } \varnothing} \quad \text{и } RC\text{-четыреполюсника}$$

$R_{\text{шн}}^{(n)} = 0, \quad G_{\text{ш } a}^{(n)} = R_{\text{ш}}/|Z|^2, \quad Z_{\text{кор}}^{(n)} = 0$, а также сигнальными параметрами транзистора $h_{11}^{(a)} = h_{11\varnothing}, h_{12}^{(a)} = h_{12\varnothing}, h_{21}^{(a)} = h_{21\varnothing}, h_{22}^{(a)} = h_{22\varnothing}$ и пассивного четырехполюсника $z_{11}^{(n)} = Z, z_{12}^{(n)} = -Z, z_{21}^{(n)} = Z, z_{22}^{(n)} = -Z$, используя табл. 3.1, группа $U-U$, определим первичные шумовые параметры

$$G_{\text{ш } a}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш } a \varnothing} |h_{21\varnothing}|^2 + R_{\text{ш}} |h_{22\varnothing}|^2}{|h_{21\varnothing} - h_{22\varnothing} Z|^2}, \quad (3.1)$$

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн } \varnothing} + \frac{G_{\text{ш } a \varnothing} R_{\text{ш}} |Z_{\text{кор}} \varnothing h_{22\varnothing} - \Delta h_{\varnothing} - h_{21\varnothing}|^2}{G_{\text{ш } a \varnothing} |h_{21\varnothing}|^2 + R_{\text{ш}} |h_{22\varnothing}|^2}, \quad (3.2)$$

$$Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор } \varnothing} - \frac{(G_{\text{ш } a \varnothing} h_{21\varnothing}^* Z + R_{\text{ш}} h_{22\varnothing}^*) (Z_{\text{кор}} \varnothing h_{22\varnothing} - \Delta h_{\varnothing} - h_{21\varnothing})}{G_{\text{ш } a \varnothing} |h_{21\varnothing}|^2 + R_{\text{ш}} |h_{22\varnothing}|^2}; \quad (3.3)$$

в случае шумов только теплового происхождения — $G_{\text{ш}} = G$ и $R_{\text{ш}} = R$.

Пример 1. Расчет показателей шума транзистора с ООС последовательного типа (рис. 3.1а).

Имеем данные для транзистора: $h_{11\varnothing} = 2,1$ кОм, $h_{21\varnothing} = 9,3 \cdot 10^{-3}$, $h_{12\varnothing} = -65,6$, $h_{22\varnothing} = -0,3 \cdot 10^{-3}$ См, $R_{\text{шн } \varnothing} = 253$ Ом, $G_{\text{ш } a \varnothing} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ См, $Z_{\text{кор } \varnothing} = 37 - i 376$ Ом и цепи ООС: $Z = 100 - i 5$ Ом, $R_{\text{ш}} = 100$ Ом.

Представленная на рис. 3.1а схема подключения RC -цепи к транзистору наиболее распространена. Включенный параллельно резистору G конденсатор C уменьшает ООС на высоких частотах, за счет этого происходит простейшая коррекция амплитудно-частотных искажений (ценой потери усиления на более низких частотах). В рассматриваемом случае $G \gg |\omega C|$, при последующих расчетах влиянием емкости пренебрежем, полагая $R \approx 1/G$ и $R_{\text{ш}} \approx 1/G_{\text{ш}}$.

Для расчета первичных шумовых параметров воспользуемся (3.1) — (3.3). Подставив в них исходные данные, получим:

$$G_{шa}^{(p)} = \frac{G_{шa} |h_{21a}|^2 + R_{ш} |h_{22a}|^2}{|h_{21a} - h_{22a}R|^2} =$$

$$= \frac{1,6 \cdot 10^{-3} |-65,6|^2 + 100 |-0,3 \cdot 10^{-3}|^2}{|-65,6 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 100|^2} \approx 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ См},$$

$$R_{шн}^{(p)} = R_{шнa} + \frac{G_{шa} R_{ш} |Z_{корa} h_{22a} - \Delta h_a - h_{21a}|^2}{G_{шa} |h_{21a}|^2 + R_{ш} |h_{22a}|^2} = 253 +$$

$$+ \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 100 |(37 - i 376)(-0,3 \cdot 10^{-3}) + 1,24 + 65,6|^2}{1,6 \cdot 10^{-3} |-65,6|^2 + 100 |-0,3 \cdot 10^{-3}|^2} =$$

$$= 353,02 \text{ Ом},$$

$$Z_{кор}^{(p)} = Z_{корa} - \frac{(G_{шa} h_{21a}^* R + R_{ш} h_{22a}^*) (Z_{корa} h_{22a} - \Delta h_a - h_{21a})}{G_{шa} |h_{21a}|^2 + R_{ш} |h_{22a}|^2} =$$

$$= 37 - i 376 - \frac{[1,6 \cdot 10^{-3} \cdot (-65,6) \cdot 100 + 100 (-0,3 \cdot 10^{-3})] \times \rightarrow}{1,6 \cdot 10^{-3} |-65,6|^2 + 100 |-0,3 \cdot 10^{-3}|^2} =$$

$$\rightarrow \times [(37 - i 376)(-0,3 \cdot 10^{-3}) + 1,24 + 65,6] = 137,2 - i 375,82.$$

Найдем избыточный коэффициент шума при $R_{н1}=300 \text{ Ом}$ ($Z_1=$

$$= R_{н1}): F_n^{(p)} = \frac{R_{шн}^{(p)} + G_{шa}^{(p)} |Z_1 + Z_{кор}^{(p)}|^2}{R_{ш1}} =$$

$$= \frac{353,2 + 1,6 \cdot 10^{-3} |300 + 137,2 - i 375,82|^2}{300} = 2,95,$$

далее при необходимости можно определить условия оптимизации и минимизации коэффициента шума.

Транзистор с ООС параллельного типа. При соединении коллектора транзистора с базой через проводимость $Y(Z)$ (рис. 3.2а) возникает отрицательная обратная

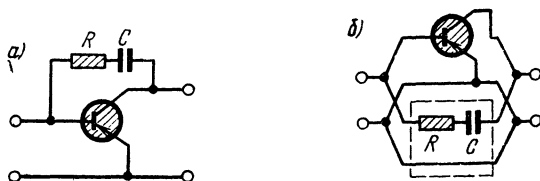


Рис. 3.2. Транзистор с ООС по напряжению (а), представленный в виде параллельного соединения с пассивным четырехполюсником (б)

связь по напряжению. Шумы такого соединения рассчитываются путем приведения схемы к виду, показанному на рис. 3.2б, представляющему параллельное соединение транзистора и пассивного четырехполюсника. Располагая шумовыми параметрами $R_{ш а э}$, $G_{шн э}$, $Y_{кор э}$ и $R_{ш а}^{(п)} = G_{ш} / |Y|^2$, $G_{шн}^{(п)} = 0$, $Y_{кор}^{(п)} = 0$, а также соответствующими сигнальными параметрами $h_{11}^{(а)} = h_{11э}$, $h_{12}^{(а)} = h_{12э}$, $h_{21}^{(а)} = h_{21э}$, $h_{22}^{(а)} = h_{22э}$ и $y_{11}^{(п)} = Y$, $y_{12}^{(п)} = -Y$, $y_{21}^{(п)} = Y$, $y_{22}^{(п)} = -Y$, по формулам табл. 3.1, группа I—I, найдем

первичные шумовые параметры:

$$R_{ш а}^{(р)} = \frac{R_{ш а э} |h_{21э}|^2 + G_{ш} |h_{11э}|^2}{|h_{21э} + h_{11э} Y|^2}, \quad (3.4)$$

$$G_{шн}^{(р)} = G_{шн э} + \frac{R_{ш а э} G_{ш} |Y_{кор э} h_{11э} - h_{21э} - 1|^2}{R_{ш а э} |h_{21э}|^2 + G_{ш} |h_{11э}|^2}, \quad (3.5)$$

$$Y_{кор}^{(р)} = Y_{кор э} - \frac{(R_{ш а э} h_{21э}^* Y - G_{ш} h_{21э}^*) (Y_{кор э} h_{11э} - h_{21э} - 1)}{R_{ш а э} |h_{21э}|^2 + G_{ш} |h_{11э}|^2}, \quad (3.6)$$

в случае шумов только теплового происхождения — $R_{ш} = R$ и $G_{ш} = G$.

Пример 2. Расчет показателей шума транзистора с ООС параллельного типа (рис. 3.2).

Транзистор имеет сигнальные и шумовые параметры, аналогичные использованным в предыдущем примере. Но для параллельного соединения удобна вторая система первичных шумовых параметров, поэтому рассчитаем:

$$R_{ш а э} = R_{шн э} + G_{ш а э} |Z_{кор э}|^2 = 253 + 1,6 \cdot 10^{-3} |37 - i 376|^2 = 481,4 \text{ Ом},$$

$$G_{шн э} = \frac{R_{шн э} G_{ш а э}}{|Z_{кор э}|^2 G_{ш а э} + R_{шн э}} = \frac{253 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{|37 - i 376|^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} + 253} = 0,84 \cdot 10^{-3} \text{ См},$$

$$Y_{кор э} = \frac{Z_{кор э}^* G_{ш а э}}{|Z_{кор э}|^2 G_{ш а э} + R_{шн э}} = \frac{(37 + i 376) \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}}{|37 - i 376|^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} + 253} = (0,123 + i 1,125) \cdot 10^{-3} \text{ См}.$$

Цепь ООС образована включенной между коллектором и базой транзистора проводимостью $Y = 1000 + i 10 \text{ См}$.

Рассматриваемая схема ООС параллельного типа наиболее часто встречается на практике. Конденсатор C обычно выполняет функции

развязывающего элемента или же служит целям коррекции амплитудно-частотной характеристики в области нижних частот. В данном случае $R \gg |1/\omega C|$, поэтому в последующих расчетах влиянием емкости пренебрежем, принимая $G \approx 1/R$ и $G_{ш} \approx 1/R_{ш}$.

Первичные шумовые параметры соединения рассчитаем по (3.4)–(3.6):

$$\begin{aligned}
 R_{ш а}^{(p)} &= \frac{R_{ш а} |h_{21э}|^2 + G_{ш} |h_{11э}|^2}{|h_{21э} + h_{11э} G|^2} = \\
 &= \frac{481,4 | -65,6 |^2 + 10^{-3} | 2,1 \cdot 10^3 |^2}{| -65,6 + 2,1 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} |^2} = 516,35 \text{ Ом}, \\
 G_{шн}^{(p)} &= G_{шн э} + \frac{R_{ш а} G_{ш} |Y_{кор э} h_{11э} - h_{21э} - 1|^2}{R_{ш а} |h_{21э}|^2 + G_{ш} |h_{11э}|^2} = 0,84 \cdot 10^3 + \\
 &+ \frac{481,4 \cdot 10^{-3} | (0,123 + i 1,25) \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^3 - 1 + 65,6 |^2}{481,4 | -65,6 |^2 + 10^{-3} | 2,1 \cdot 10^3 |^2} = \\
 &= 1,86 \cdot 10^{-3} \text{ См}, \\
 Y_{кор}^{(p)} &= Y_{кор э} - \frac{(R_{ш а} h_{21э}^* G - G_{ш} h_{11э}^*) (Y_{кор э} h_{11э} - h_{21э} - 1)}{R_{ш а} |h_{21э}|^2 + G_{ш} |h_{11э}|^2} = \\
 &= (0,123 + i 1,25) \cdot 10^{-3} - \\
 &- \frac{[481,4 \cdot 10^{-3} (-65,6) 10^{-3} - 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^3] \times \rightarrow}{481,4 | -65,6 |^2 + 10^{-3} | 2,1 \cdot 10^3 |^2} \rightarrow \\
 &\rightarrow \times [(0,123 + i 1,25) \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^3 - 1 + 65,6] = \\
 &= (1,202 + i 1,205) \cdot 10^{-3} \text{ См}.
 \end{aligned}$$

Избыточный коэффициент шума соединения определим при внутреннем сопротивлении источника сигнала $R_{н1} = 300 \text{ Ом}$ ($Y_1 = G_{н1} = 1/R_{н1}$),

$$\begin{aligned}
 F_{ш}^{(p)} &= \frac{G_{шн}^{(p)} + R_{ш а}^{(p)} |G_{н1} + Y_{кор}^{(p)}|^2}{G_{ш1}} = \\
 &= \frac{1,86 \cdot 10^{-3} + 516,35 | 3,33 \cdot 10^{-3} + (1,202 + i 1,205) \cdot 10^{-3} |^2}{3,33 \cdot 10^{-3}} = \\
 &= 3,97.
 \end{aligned}$$

Транзистор с ОСС последовательно-параллельного типа. При подключении к транзистору сопротивлений $Z_1 = R_1$ и $R_2 = i/\omega C$ (рис. 3.3а) образуется отрицательная обратная связь по току и напряжению. Такая ООС получается при последовательно-параллельном соединении

транзистора и пассивного четырехполюсника (рис. 3.36), шумовые параметры которого $R_{\text{шн}}^{(n)} = R_{\text{ш1}}R_{\text{ш2}}/(R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}})$, $G_{\text{ш а}}^{(n)} = (R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}})/|Z_1|^2$, $Z_{\text{кор}}^{(n)} = Z_1/R_{\text{ш2}}/(R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}})$, сигнал-

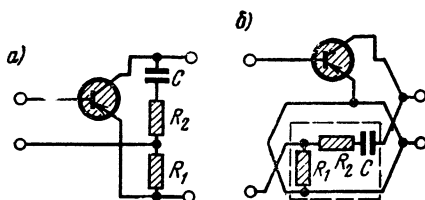


Рис. 3.3. Транзистор с ООС по току и напряжению (а), представленный в виде последовательно-параллельного соединения с пассивным четырехполюсником (б)

ные транзистора: $h_{11}^{(a)} = h_{11s}$, $h_{12}^{(a)} = h_{12s}$, $h_{21}^{(a)} = h_{21s}$, $h_{22}^{(a)} = h_{22s}$, и пассивного четырехполюсника: $z_{11}^{(n)} = Z_1$, $z_{12}^{(n)} = -Z_1$, $z_{21}^{(n)} = Z_1$, $z_{22}^{(n)} = -(Z_1 + Z_2)$.

По формулам табл. 3.1, группа $U-I$, определим

$$G_{\text{ш а}}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш а э}} |h_{21s} (Z_1 + Z_2)|^2 + R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}}{|h_{21s} (Z_1 + Z_2) - Z_1|^2}, \quad (3.7)$$

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн э}} + \frac{1}{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} \left[R_{\text{ш1}}R_{\text{ш2}} + \frac{G_{\text{ш а э}} |(Z_{\text{кор э}} - h_{11s})(R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}) + (Z_1R_{\text{ш2}} - R_{\text{ш1}}Z_2)h_{21s}|^2}{G_{\text{ш а э}} |h_{21s} (Z_1 + Z_2)|^2 + R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} \right], \quad (3.8)$$

$$Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор э}} + \frac{1}{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} \left\{ Z_1R_{\text{ш2}} - \frac{[G_{\text{ш а э}} h_{21s}^* (Z_1 + Z_2)^* Z_1 + R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}] [(Z_{\text{кор э}} - h_{11s}) \times \rightarrow}{G_{\text{ш а э}} |h_{21s} (Z_1 + Z_2)|^2 + R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}} \rightarrow \times (R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}) + (Z_1R_{\text{ш2}} - R_{\text{ш1}}Z_2)h_{21s} \right\}, \quad (3.9)$$

при тепловых флуктуациях $R_{\text{ш1}} = R_1$ и $R_{\text{ш2}} = R_2$.

Пример 3. Расчет показателей шума транзистора с ООС последовательно-параллельного типа (рис. 3.3).

Используем параметры транзистора, заданные в предыдущих примерах, и элементов цепи ООС: $Z_1=100$ Ом и $Z_2=1000-i5$ Ом. Конденсатор в цепи ООС используется для развязки по постоянному току или коррекции амплитудно-частотной характеристики в области нижних частот. Так как $R_2 \gg 1/\omega C$, то в последующих расчетах влияние его не учитывается.

Первичные шумовые параметры соединения рассчитаем по (3.7) — (3.9):

$$\begin{aligned}
 G_{ш а}^{(p)} &= \frac{G_{ш а э} |h_{21э} (R_1 + R_2)|^2 + R_{ш1} + R_{ш2}}{|h_{21э} (R_1 + R_2) - R_1|^2} = \\
 &= \frac{1,6 \cdot 10^{-3} |-65,6 (100 + 1000)|^2 + 100 + 1000}{|-65,6 (100 + 1000) - 100|^2} = 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \\
 R_{шн}^{(p)} &= R_{шн э} + \frac{1}{R_{ш1} + R_{ш2}} \left[R_{ш1} R_{ш2} + \right. \\
 &+ \left. \frac{G_{ш а э} (Z_{кор э} - h_{11э}) (R_{ш1} + R_{ш2}) + (R_1 R_{ш2} - R_{ш1} R_2) h_{21э} |^2}{G_{ш а э} |h_{21э} (R_1 + R_2)|^2 + R_{ш1} + R_{ш2}} \right] = \\
 &= 253 + \frac{1}{100 + 1000} \left[100 \cdot 1000 + \frac{1,6 \cdot 10^{-3} |(37 - i 376 - \rightarrow}{1,6 \cdot 10^{-3} |-65,6) \times \rightarrow} \right. \\
 &\rightarrow - 2,1 \cdot 10^{-3} (100 + 1000) + (100 \cdot 1000 - 100 \cdot 1000) (-65,6) |^2 \left. \rightarrow \right] = \\
 &= 344,8 \text{ Ом}, \\
 Z_{кор}^{(p)} &= Z_{кор э} + \frac{1}{R_{ш1} + R_{ш2}} \left\{ Z_1 R_{ш2} - \frac{[G_{ш а э} h_{21э}^* (R_1 + R_2)^* Z_1 + \rightarrow}{G_{ш а э} |h_{21э} (R_1 + R_2)|^2 + \rightarrow} \right. \\
 &\rightarrow + R_{ш1} + R_{ш2} \left. \rightarrow \right\} [(Z_{кор э} - h_{11э}) (R_{ш1} + R_{ш2}) + (Z_1 R_{ш2} - \rightarrow \\
 &\rightarrow + R_{ш1} + R_{ш2} \\
 &\rightarrow - R_{ш1} Z_2) h_{21э}] \left. \rightarrow \right\} = 37 - i 376 + \frac{1}{100 + 1000} \left\{ 100 \cdot 1000 - \right. \\
 &- \frac{[1,6 \cdot 10^{-3} (-65,6) (100 + 1000) 100 + 100 + 1000] \times \rightarrow}{1,6 \cdot 10^{-3} |(-65,6) (100 + 1000)|^2 + 100 + 1000} \\
 &\rightarrow \times [(37 - i 376 - 2,1 \cdot 10^3) (100 + 1000) (100 \cdot 1000 - \rightarrow \\
 &\rightarrow - 1000 \cdot 100) (-65,6)] \left. \rightarrow \right\} = 125,4 - i 376,47 \text{ Ом}.
 \end{aligned}$$

Избыточный коэффициент шума соединения рассчитаем при $Z_{ш1}=300$ Ом:

$$\begin{aligned}
 F_n^{(p)} &= \frac{R_{шн}^{(p)} + G_{ш а}^{(p)} |Z_1 + Z_{кор}^{(p)}|^2}{R_{ш1}} = \\
 &= \frac{344,8 + 1,59 \cdot 10^{-3} |300 + 125,4 - i 376,47|^2}{300} = 2,86,
 \end{aligned}$$

Транзистор с ОСС параллельно-последовательного типа. Подключение к транзистору сопротивлений $Z_1 = R_1 - i/\omega C$ и $Z_2 = R_2$ (рис. 3.4) создает отрицательную

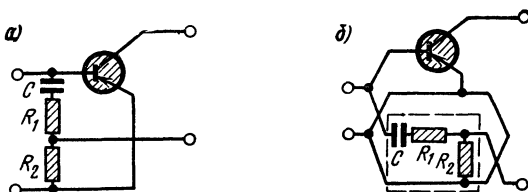


Рис. 3.4. Транзистор с ОСС по напряжению и току (а), представленный в виде параллельно-последовательного соединения с пассивным четырехполюсником (б)

ОС по напряжению и току. Такое включение можно представить в виде параллельно-последовательного соединения транзистора и пассивного четырехполюсника (рис. 3.4б). Определив шумовые параметры последнего

$R_{ш а}^{(n)} = (G_{ш1} + G_{ш2})/|Y_1|^2$, $G_{шн}^{(n)} = G_{ш1}G_{ш2}/(G_{ш1} + G_{ш2})$, $Y_{кор}^{(n)} = Y_1G_{ш2}/(G_{ш1} + G_{ш2})$, используя сигнальные параметры транзистора: $h_{11}^{(a)} = h_{11э}$, $h_{12}^{(a)} = h_{12э}$, $h_{21}^{(a)} = h_{21э}$, $h_{22}^{(a)} = h_{22э}$ и пассивного четырехполюсника: $y_{11}^{(n)} = Y_1$, $y_{12}^{(n)} = -Y_1$, $y_{21}^{(n)} = Y_1$, $y_{22}^{(n)} = -(Y_1 + Y_2)$, по формулам табл. 3.1, группа I—U, найдем:

$$R_{ш а}^{(p)} = \frac{R_{ш а э} |h_{21э}(Y_1 + Y_2)|^2 + (G_{ш1} + G_{ш2}) |\Delta h_э|^2}{|h_{21э}(Y_1 + Y_2) + \Delta h_э Y_1|^2}, \quad (3.10)$$

$$G_{шн}^{(p)} = G_{шн э} + \frac{1}{G_{ш1} + G_{ш2}} \left[G_{ш1}G_{ш2} + \frac{R_{ш а э} |(Y_{кор э} \Delta h_э - h_{22э})(G_{ш1} + G_{ш2}) - (G_{ш2}Y_1 - G_{ш1}Y_2)h_{21э}|^2}{R_{ш а э} |h_{21э}(Y_1 + Y_2)|^2 + (G_{ш1} + G_{ш2}) |\Delta h_э|^2} \right], \quad (3.11)$$

$$Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор э} + \frac{1}{G_{ш1} + G_{ш2}} \left\{ Y_1G_{ш2} + \frac{[R_{ш а э} h_{21э}(Y_1 + Y_2)^* Y_1 - \rightarrow}{R_{ш а э} |h_{21э}(Y_1 + Y_2)|^2 + \rightarrow} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} & \rightarrow - (G_{ш1} + G_{ш2}) \Delta h_3 \left[(Y_{кор \varepsilon} \Delta h - h_{22\varepsilon}) (G_{ш1} + G_{ш2}) \rightarrow \right. \\ & \quad \left. \rightarrow + (G_{ш1} + G_{ш2}) \mid \Delta h_3 \mid^2 \right. \\ & \left. \rightarrow - (Y_1 G_{ш2} - G_{ш1} Y_2) h_{21\varepsilon} \right] \} . \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Вторичные шумовые параметры и избыточный коэффициент шума рассчитываются по [35].

Пример 4. Расчет показателей шума транзистора с ООС параллельно-последовательного типа (рис. 3.4).

Параметры транзистора возьмем из предыдущих примеров и элементов цепи ООС: $Z_1 = 1000 - i 5 \text{ Ом}$, $Z_2 = 100 \text{ Ом}$. Конденсатор здесь также используется для развязки по постоянному току или коррекции амплитудно-частотной характеристики на нижнем краю диапазона. На расчетной частоте сопротивление конденсатора пренебрежимо мало в сравнении с сопротивлением резистора $R_1 \gg |1/\omega C|$, поэтому в последующем расчете примем $G_1 \approx 1/R_1$ и $G_{ш1} \approx 1/R_{ш1}$.

По (3.10) — (3.12) рассчитаем вначале первичные шумовые параметры соединения:

$$\begin{aligned} R_{ш а}^{(p)} &= \frac{R_{ш а \varepsilon} \mid h_{21\varepsilon} (G_1 + G_2) \mid^2 + (G_{ш1} + G_{ш2}) \mid \Delta h_3 \mid^2}{\mid h_{21\varepsilon} (G_1 + G_2) + \Delta h_3 G_1 \mid^2} = \\ &= \frac{481,4 \mid (-65,6) (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}) \mid^2 + (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}) \times \rightarrow}{\mid (-65,6) (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}) (-0,02) \cdot 1 \cdot 10^{-3} \mid^2} \rightarrow \\ &\rightarrow \times \mid -0,02 \mid^2 = 481,36 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{шн}^{(p)} &= G_{шн \varepsilon} + \frac{1}{G_{ш1} + G_{ш2}} \left[G_{ш1} G_{ш2} + \frac{R_{ш а \varepsilon} \mid (Y_{кор \varepsilon} \Delta h - h_{22\varepsilon}) \times \rightarrow}{R_{ш а \varepsilon} \mid h_{21\varepsilon} (G_1 + G_2) \mid^2 + \rightarrow} \right. \\ &\quad \left. \rightarrow \times (G_{ш1} + G_{ш2}) - (G_{ш2} G_1 - G_{ш1} G_2) h_{21\varepsilon} \mid^2 \right. \\ &\quad \left. \rightarrow + (G_{ш1} + G_{ш2}) \mid \Delta h_3 \mid^2 \right] = 0,84 \cdot 10^{-3} + \\ &+ \frac{1}{1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}} \left[1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-2} + \frac{481,4 \mid [(0,123 + i 1,25) \times \rightarrow}{481,4 \mid (-65,6) \times \rightarrow} \right. \\ &\quad \rightarrow \times 10^{-3} (-0,02) + 0,3 \cdot 10^{-3} \mid (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}) \rightarrow \\ &\quad \rightarrow \times (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}) \mid^2 + (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}) \times \rightarrow \\ &\quad \left. \rightarrow - (1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-2}) (-65,6) \mid^2 \right] = \\ &\quad \rightarrow \times \mid -0,02 \mid^2 \Big] = \\ &= 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ См}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{кор}^{(p)} &= Y_{кор \varepsilon} + \frac{1}{G_{ш1} + G_{ш2}} \left\{ G_1 G_{ш2} + \frac{[(R_{ш а \varepsilon} h_{21\varepsilon}^* (G_1 + G_2) G_1 - \leftarrow}{R_{ш а \varepsilon} \mid h_{21\varepsilon} (G_1 + G_2) \mid^2 + \rightarrow} \right. \\ &\quad \left. \rightarrow - (G_{ш1} + G_{ш2}) \Delta h_3 \right] \left[(Y_{кор \varepsilon} \Delta h_3 - h_{22\varepsilon}) (G_{ш1} + G_{ш2}) \rightarrow \right. \\ &\quad \left. \rightarrow + (G_{ш1} + G_{ш2}) \mid \Delta h_3 \mid^2 \right. \end{aligned}$$

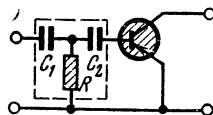
$$\begin{aligned}
& \frac{\rightarrow - (G_1 G_{шз} - G_{ш1} G_2) h_{21з}}{\left. \right\}} = (0,123 + i 1,25) 10^{-3} + \\
& + \frac{1}{1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}} \left\{ 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-2} + \frac{[481,4 (-65,6) \times \rightarrow}{481,4 | (-65,6) \times \rightarrow} \right. \\
& \frac{\rightarrow \times (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}) 1 \cdot 10^{-3} - (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}) (-0,02)] \times \rightarrow}{\rightarrow \times (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2})|^2 + (1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-2}) | -0,02|^2} \\
& \left. \frac{\rightarrow \times [(0,123 + i 1,25) \cdot 10^{-3} (-0,02 - 0,3 \cdot 10^{-3}) (1 \cdot 10^{-3} + \rightarrow}{\rightarrow + 1 \cdot 10^{-2}) - (3 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}) (-65,6)] \right\} = \\
& = (1,03 + i 1,25) \cdot 10^{-3} \text{ См.}
\end{aligned}$$

Избыточный коэффициент шума соединения определим при $R_{н1} = 300 \text{ Ом}$ ($Y_1 = G_{н1} = 1/R_{н1}$);

$$\begin{aligned}
F_{и}^{(p)} &= \frac{G_{шн}^{(p)} + R_{шз}^{(p)} |G_{н1} + Y_{кор}^{(p)}|^2}{G_{ш1}} = \\
&= \frac{1,75 \cdot 10^{-3} + 481,36 |3,33 \cdot 10^{-3} + (1,03 + i 1,25) \cdot 10^{-3}|^2}{3,33 \cdot 10^{-3}} = 3,56.
\end{aligned}$$

Транзистор с RC-цепью на входе. Соединение изображено на рис. 3.5 и представляет собой каскадное вклю-

Рис. 3.5. Транзистор с RC-цепью на входе



чение пассивного четырехполюсника с транзистором. Располагая шумовыми параметрами $R_{шн}^{(a)} = R_{шнз}$, $G_{шз}^{(a)} = G_{шзз}$, $Z_{кор}^{(a)} = Z_{корз}$ и получаемыми из табл. 2.11 $\bar{R}_{шн}^{(n)} = 0$, $G_{шз}^{(n)} = R_{ш2}/|R_2|^2$ и $Z_{кор}^{(n)} = -i \frac{1}{\omega C_1}$, а также сигнальными величинами $a_{11}^{(n)} = 1 + Z_1 Y_2$, $a_{12}^{(n)} = Z_1 + Z_3 + Z_1 Y_2 Z_3$, $a_{12}^{(n)} = Y_2$ и $a_{22}^{(n)} = 1 + Y_2 Z_3$ (где $Z_1 = -i/\omega C$, $Z_2 = R$, $Z_3 = i/\omega C$, $R_{ш2} = R$), по формулам табл. 3.1, группа ПА, определим

$$G_{ш а}^{(p)} = \frac{R_{ш2} + R_{шн э} + G_{ш а э} |Z_2 + Z_3 + Z_{кор э}|^2}{|Z_2|^2}, \quad (3.13)$$

$$R_{шн}^{(p)} = \frac{R_{шн э} (R_{ш2} + G_{ш а э} |Z_2|^2) + G_{ш а э} R_{ш2} |Z_3 + Z_{кор э}|^2}{R_{ш2} + R_{шн э} + G_{ш а э} |Z_2 + Z_3 + Z_{кор э}|^2}, \quad (3.14)$$

$$Z_{кор}^{(p)} = Z_1 + Z_2 \frac{R_{шн э} + G_{ш а э} (Z_2 + Z_3 + Z_{кор э})^* (Z_3 + Z_{кор э})}{R_{ш2} + R_{шн э} + G_{ш а э} |Z_2 + Z_3 + Z_{кор э}|^2}. \quad (3.15)$$

Пример 5. Расчет показателей шума транзистора с *RC*-четырёх-полюсником на входе (рис. 3.5).

Параметры транзистора примем из первого примера, и элементы *RC*-цепи: $Z_1 = -i 159,24$ Ом, $Z_2 = 1000$ Ом, $Z_3 = -i 159,24$ Ом. Первые шумовые параметры соединения рассчитаем по (3.13) — (3.14):

$$G_{ш а}^{(p)} = \frac{R_{ш2} + R_{шн э} + G_{ш а э} \left| R_2 - i \frac{1}{\omega C_3} + Z_{кор э} \right|^2}{R_2^2} =$$

$$= \frac{1000 + 253 + 1,6 \cdot 10^{-3} |1000 - i 159,24 + 37 - i 376|^2}{1000^2} =$$

$$= 3,43 \cdot 10^{-3} \text{ См},$$

$$R_{шн}^{(p)} = \frac{R_{шн э} (R_{ш2} + G_{ш а э} R_2^2) + G_{ш а э} R_{ш2} \left| -i \frac{1}{\omega C_3} + Z_{кор э} \right|^2}{R_{ш2} + R_{шн э} + G_{ш а э} \left| R_2 - i \frac{1}{\omega C_3} + Z_{кор э} \right|^2} =$$

$$= \frac{253 (1000 + 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1000^2) + 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 | \rightarrow$$

$$\rightarrow \times | -i 159,24 + 37 - i 376|^2}{1000 + 253 + 1,6 \cdot 10^{-3} | 1000 - i 159,24 + \rightarrow$$

$$\rightarrow + 37 - i 376|^2} = 325,86 \text{ Ом},$$

$$Z_{кор}^{(p)} = -i \frac{1}{\omega C_1} + R_2 \frac{R_{шн э} + G_{ш а э} \left(R_2 - i \frac{1}{\omega C_3} + Z_{кор э} \right)^* \times \rightarrow$$

$$\rightarrow \times \left(-i \frac{1}{\omega C_3} + Z_{кор э} \right)}{R_{ш2} + R_{шн э} + G_{ш а э} \left| R_2 - i \frac{1}{\omega C_3} + \rightarrow$$

$$\rightarrow + Z_{кор э} \right|^2} = -i 159,24 + 1000 \times$$

$$\times \frac{253 + 1,6 \cdot 10^{-3} (1000 - i 159,24 + 37 - i 376)^* \times \rightarrow}{1000 + 253 + 1,6 \cdot 10^{-3} |1000 - i 159,24 + 37 - \rightarrow} \\ \rightarrow \times \frac{(-i 159,24 + 37 - i 376)}{\rightarrow - i 376|^2} = 225,12 - i 408,9 \text{ Ом.}$$

Избыточный коэффициент шума соединения определим при $Z_1 = 300 \text{ Ом}$, $R_{ш1} = 300 \text{ Ом}$:

$$F_n = \frac{R_{шн}^{(p)} + G_{шa}^{(p)} |Z_1 + Z_{кор}^{(p)}|^2}{R_{ш1}} = \\ = \frac{325,86 + 3,43 \cdot 10^{-3} |300 + 225,12 - i 408,9|^2}{300} = 6,15.$$

3.2. РАСЧЕТ ШУМОВ ЦЕПЕЙ С ОПЕРАЦИОННЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

Развитие микроэлектроники выдвинуло в число устройств массового применения операционные усилители, изготавливаемые методами интегральной технологии, но использование их затрудняется ограниченностью паспортных данных [36].

Нормируемые показатели $R_{вх}$, $R_{вых}$, K_n , а также для некоторых типов операционных усилителей $e_{ш}$ и $i_{ш}$ не раскрывают в полной мере их свойства и недостаточны для точных расчетов. Это сдерживает применение операционных усилителей в оборудовании, к которому предъявляются высокие требования по сигнальным и шумовым показателям, стабильности и повторяемости параметров.

Операционные усилители обычно содержат несколько активных элементов, соединенных определенным образом между собой; имеют они в своем составе и пассивные элементы или их аналоги. Поэтому структурно операционные усилители представляют собой сложные четырехполюсники, которые могут быть охарактеризованы результирующими параметрами — сигнальными и шумовыми в первую очередь.

Прежде чем перейти к расчету шумов цепей с операционными усилителями, определим системы сигнальных и шумовых параметров, наилучшим образом учитывающие его особенности как активного элемента цепи. Принадлежность операционных усилителей к категории шумящих четырехполюсников не требует особых доказа-

тельств — необходимые и достаточные признаки очевидны. В числе их — наличие между внешними выводами шумовых токов при замыкании и напряжений — при размыкании, которые независимы от источника сигнала и обусловлены внутренними флуктуациями.

Операционные усилители имеют преимущественно высокое входное сопротивление и низкое выходное, поэтому наиболее удобна для выражения их свойств система f -параметров. На рис. 3.6 представлен в виде шумяще-

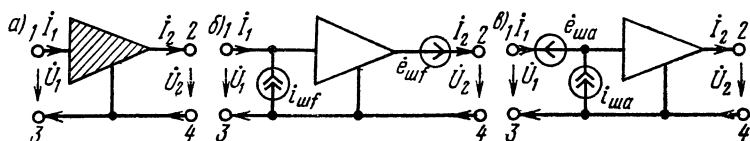


Рис. 3.6. Операционный усилитель:

а) с внутренними источниками флуктуаций, б) с вынесенными ко входу и выходу эквивалентными источниками шума, в) при отнесении последних ко входу

го четырехполюсника с общей стороной операционный усилитель (наличие внутренних флуктуаций означено штриховкой). Пользуясь известным приемом, представим его состоящим из бесшумного четырехполюсника (рис.

3.6б) с сигнальными параметрами: $f_{11} = (I_{c1}/U_{c1})_{I_{c2}=0}$ — входная проводимость; $f_{12} = (I_{c1}/I_{c2})_{U_{c1}=0}$ — обратное усиление по току; $f_{21} = (U_{c2}/U_{c1})_{I_{c2}=0}$ — прямое усиление по напряжению; $f_{22} = (U_{c2}/I_{c2})_{U_{c1}=0}$ — выходное сопротивление и вынесенных источников шума i_{wf} и e_{wf} , учитывающих внутренние флуктуации. Эти параметры определяются в режимах короткого замыкания на входе и холостого хода — на выходе, легко осуществимых для операционного усилителя. Между f -параметрами, сигнальными и шумовыми величинами других систем существуют строгие зависимости [3, 15, 35]

Операционные усилители в соединении с пассивными четырехполюсниками позволяют образовывать различные функциональные цепи, обладающие, например, частотной избирательностью, свойствами преобразования сопротивлений, коррекцией амплитудно-частотных искажений и т. д.

Рассмотрим наиболее распространенные соединения операционных усилителей и пассивных RC -цепей. Основные виды таких соединений и формулы результирующих шумовых параметров представлены в табл. 3.2. Они получены из обобщенных соотношений [35] в системе f -параметров для операционного усилителя и z - или y -параметров RC -цепи. Используя формулы табл. 3.2, можно рассчитать шумовые величины значительного числа соединений RC -цепи с операционными усилителями. Останемся на наиболее типичных из них.

Операционный усилитель с ООС по току последовательного типа. При включении RC -цепи по схеме рис. 3.7а возник-

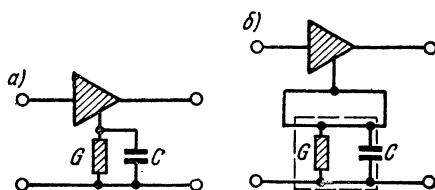


Рис. 3.7. Операционный усилитель с ООС по току (а), представленный в виде последовательного соединения с пассивным четырехполюсником (б)

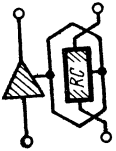

кает отрицательная обратная связь по току, но осуществление ее возможно лишь при определенном построении схемы усилителя и при наличии выводов наружу соответствующих точек схемы.

Шумовые показатели такой цепи несложно рассчитать, представив ее в виде последовательного соединения операционного усилителя и RC -четырехполюсника (рис. 3.7б), обведенного пунктиром. Располагая шумовыми и сигнальными параметрами операционного усилителя $R_{шн}^{(a)}$, $G_{ш а}^{(a)}$, $Z_{кор}^{(a)}$, f_{11} , f_{12} , f_{21} , f_{22} и RC -цепи и полученными из табл. 2.12 $R_{шн}^{(n)} = 0$, $G_{ш а}^{(n)} = \omega^2 C^2 R_{ш} / (\omega^2 C^2 R^2 + 1)$, $Z_{кор}^{(n)} = 0$ и $z_{11}^{(n)} = Z$, $z_{12}^{(n)} = -Z$, $z_{21}^{(n)} = Z$, $z_{22}^{(n)} = -Z$,



используя формулы табл. 3.2, группа $U-U$, найдем результирующие шумовые параметры соединения:

$$G_{ш а}^{(p)} = \frac{G_{ш а} |f_{21}|^2 + R_{ш} |f_{11}|^2}{|f_{21} + f_{11}Z|^2}, \quad (3.16)$$



Таблица 3.2

Тип цепи	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
$U-U$		$G_{\text{шд}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{шд}}^{(a)} f_{21} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} f_{11} z_{21} ^2}{ f_{21} + f_{11} z_{21} ^2}$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(a)} + R_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{G_{\text{шд}}^{(a)} G_{\text{шд}}^{(n)} (Z_{\text{кор}}^{(n)} f_{11} - 1) z_{21} - (Z_{\text{кор}}^{(n)} - z_{11}) f_{21} ^2}{G_{\text{шд}}^{(a)} f_{21} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} f_{11} z_{21} ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_{\text{кор}}^{(a)} + Z_{\text{кор}}^{(n)} + \frac{(G_{\text{шд}}^{(a)} f_{21}^* - G_{\text{шд}}^{(n)} f_{11}^* z_{21}^*) [(Z_{\text{кор}}^{(a)} f_{11} - 1) z_{21} - (Z_{\text{кор}}^{(n)} - z_{11}) f_{21}]}{G_{\text{шд}}^{(a)} f_{21} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} f_{11} z_{21} ^2}$
$I-I$		$R_{\text{шд}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{шд}}^{(a)} f_{21} ^2 + R_{\text{шд}}^{(n)} f_{22} y_{21} ^2}{ f_{31} - f_{22} y_{21} ^2}$
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(a)} + G_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{R_{\text{шд}}^{(a)} R_{\text{шд}}^{(n)} (Y_{\text{кор}}^{(a)} f_{22} - \Delta f) y_{21} + (Y_{\text{кор}}^{(n)} - y_{11}) f_{21} ^2}{R_{\text{шд}}^{(a)} f_{31} ^2 + R_{\text{шд}}^{(n)} f_{22} y_{21} ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_{\text{кор}}^{(a)} + Y_{\text{кор}}^{(n)} - \frac{(R_{\text{шд}}^{(a)} f_{21}^* + R_{\text{шд}}^{(n)} f_{22}^* y_{21}^*) [(Y_{\text{кор}}^{(a)} f_{22} - \Delta f) y_{21} + (Y_{\text{кор}}^{(n)} - y_{11}) f_{21}]}{R_{\text{шд}}^{(a)} f_{31} ^2 + R_{\text{шд}}^{(n)} f_{22} y_{21} ^2}$

Продолжение табл. 3.2

Тип цепи	Схема соединения	Пара-метр	Формулы результирующих шумовых параметров
$U - I$		$G_{\text{ша}}^{(a)}$	$\frac{G_{\text{ша}}^{(a)} f_{21} z_{22} ^2 + G_{\text{ша}}^{(n)} \Delta f z_{21} ^2}{ f_{21} z_{22} + \Delta f z_{21} ^2}$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{ша}}^{(a)} G_{\text{ша}}^{(n)} [(Z_{\text{кор}}^{(a)} \Delta f - f_{22}) z_{21} - (Z_{\text{кор}}^{(n)} z_{22} - \Delta z) f_{21}]^2}{G_{\text{ша}}^{(a)} f_{21} z_{22} ^2 + G_{\text{ша}}^{(n)} \Delta f z_{21} ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$\frac{(G_{\text{ша}}^{(a)} f_{21}^* z_{22}^* - G_{\text{ша}}^{(n)} \Delta f^* z_{21}^*) [(Z_{\text{кор}}^{(a)} \Delta f - f_{22}) z_{21} - (Z_{\text{кор}}^{(n)} z_{22} - \Delta z) f_{21}]}{G_{\text{ша}}^{(a)} f_{21} z_{22} ^2 + G_{\text{ша}}^{(n)} \Delta f z_{21} ^2}$
$I - U$		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ша}}^{(a)} f_{21} y_{22} ^2 + R_{\text{ша}}^{(n)} y_{21} ^2}{ f_{21} y_{22} - y_{21} ^2}$
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(a)} + G_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{R_{\text{ша}}^{(a)} R_{\text{ша}}^{(n)} [(Y_{\text{кор}}^{(a)} - f_{11}) y_{21} + (Y_{\text{кор}}^{(n)} y_{22} - \Delta y) f_{21}]^2}{R_{\text{ша}}^{(a)} f_{21} y_{22} ^2 + R_{\text{ша}}^{(n)} y_{21} ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_{\text{кор}}^{(a)} + Y_{\text{кор}}^{(n)} - \frac{(R_{\text{ша}}^{(a)} f_{21}^* y_{22}^* + R_{\text{ша}}^{(n)} y_{21}^*) [(Y_{\text{кор}}^{(a)} - f_{11}) y_{21} + (Y_{\text{кор}}^{(n)} y_{22} - \Delta y) f_{21}]}{R_{\text{ша}}^{(a)} f_{21} y_{22} ^2 + R_{\text{ша}}^{(n)} y_{21} ^2}$

Окончание табл. 3.2

Тип цепи	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
АП		$G_{\text{шд}}^{(p)}$	$G_{\text{шд}}^{(a)} + (R_{\text{шн}}^{(n)} f_{11} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} Z_{\text{кор}}^{(n)} f_{11} - \Delta f ^2) f_{21} ^{-2}$
		$R_{\text{шн}}^{(a)}$	$R_{\text{шн}}^{(a)} R_{\text{шн}}^{(n)} Z_{\text{кор}}^{(a)} f_{11} - 1 ^2 + R_{\text{шн}}^{(a)} G_{\text{шд}}^{(n)} f_{12} f_{21} ^2 + G_{\text{шд}}^{(a)} G_{\text{шд}}^{(n)} (Z_{\text{кор}}^{(n)} - f_{22}) \rightarrow \rightarrow$ $\frac{G_{\text{шд}}^{(a)} f_{21} ^2 + R_{\text{шн}}^{(n)} f_{11} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} Z_{\text{кор}}^{(n)} f_{11} - \Delta f ^2}{\rightarrow - (Z_{\text{кор}}^{(n)} f_{11} - \Delta f) Z_{\text{кор}}^{(a) 2}}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(n)} f_{11}^* (Z_{\text{кор}}^{(a)} f_{11} - 1) - G_{\text{шд}}^{(n)} (Z_{\text{кор}}^{(n)*} f_{11} - \Delta f^*) [(Z_{\text{кор}}^{(n)} - f_{22}) - (Z_{\text{кор}}^{(n)} f_{11} - \Delta f) Z_{\text{кор}}^{(a)}]$ $\frac{G_{\text{шд}}^{(a)} f_{21} ^2 + R_{\text{шн}}^{(n)} f_{11} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} Z_{\text{кор}}^{(n)} f_{11} - \Delta f ^2}{G_{\text{шд}}^{(a)} f_{21} ^2 + R_{\text{шн}}^{(n)} f_{11} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} Z_{\text{кор}}^{(n)} f_{11} - \Delta f ^2}$
ПА		$R_{\text{шд}}^{(p)}$	$R_{\text{шд}}^{(n)} + (G_{\text{шн}}^{(a)} \Delta z ^2 + R_{\text{шд}}^{(a)} z_{11} - Y_{\text{кор}}^{(a)} \Delta z ^2) z_{21} ^{-2}$
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шд}}^{(n)} G_{\text{шн}}^{(a)} z_{22} - Y_{\text{кор}}^{(n)} \Delta z ^2 + R_{\text{шд}}^{(a)} G_{\text{шн}}^{(a)} z_{12} z_{21} ^2 + R_{\text{шд}}^{(n)} R_{\text{шд}}^{(a)} \times \rightarrow$ $\frac{R_{\text{шд}}^{(n)} z_{21} ^2 + R_{\text{шд}}^{(a)} z_{11} - Y_{\text{кор}}^{(a)} \Delta z ^2 + G_{\text{шн}}^{(a)} \Delta z ^2}{\rightarrow \times [(Y_{\text{кор}}^{(a)} z_{22} - 1) + (z_{11} - Y_{\text{кор}}^{(a)} \Delta z) Y_{\text{кор}}^{(n) 2}]}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(a)} \Delta z^* (z_{22} - Y_{\text{кор}}^{(n)} \Delta z) - R_{\text{шд}}^{(a)} (z_{11} - Y_{\text{кор}}^{(a)*} \Delta z^*) [(Y_{\text{кор}}^{(a)} z_{22} - 1) \rightarrow \rightarrow$ $\frac{R_{\text{шд}}^{(n)} z_{21} ^2 + R_{\text{шд}}^{(a)} z_{11} - Y_{\text{кор}}^{(a)} \Delta z ^2 + G_{\text{шн}}^{(a)} \Delta z ^2}{\rightarrow + (z_{11} - Y_{\text{кор}}^{(a)} \Delta z) Y_{\text{кор}}^{(n) 2}}$

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}} + \frac{G_{\text{ш}} a R_{\text{ш}} |Z_{\text{кор}} f_{11} + f_{21} - 1|^2}{G_{\text{ш}} a |f_{21}|^2 + R_{\text{ш}} |f_{11}|^2}, \quad (3.17)$$

$$Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}} + \frac{(G_{\text{ш}} a f_{21}^* Z - R_{\text{ш}} f_{11}^*) (Z_{\text{кор}} + f_{21} - 1)}{G_{\text{ш}} a |f_{21}|^2 + R_{\text{ш}} |f_{11}|^2}, \quad (3.18)$$

где $Z = \frac{G}{G^2 + \omega^2 C^2} - i \frac{\omega C}{G^2 + \omega^2 C^2}$ и $R_{\text{ш}} = \frac{G_{\text{ш}}}{G^2 + \omega^2 C^2}$.

Операционный усилитель с ООС параллельного типа.
При соединении RC -цепи и операционного усилителя по схеме рис. 3.8а возникает отрицательная обратная

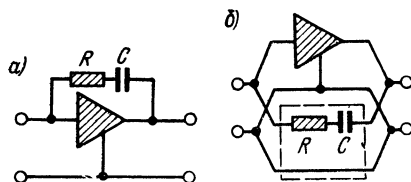


Рис. 3.8. Операционный усилитель с ООС по напряжению (а), представленный в виде параллельного соединения с пассивным четырехполюсником (б)

связь по напряжению (обычно рекомендуемая инструкциями по применению операционных усилителей). Для расчета шумов приведем соединение к виду (рис. 3.8б), представляющему параллельно включенные операционный усилитель и пассивный RC -четырёхполюсник. Используя шумовые параметры операционного усилителя $R_{\text{шн}}^{(a)}$, $G_{\text{шн}}^{(a)}$, $Y_{\text{кор}}^{(a)}$ и определяемые путем пересчета из табл. 2.12 $R_{\text{шн}}^{(n)} = G_{\text{ш}} / (G^2 + \omega^2 C^2)$, $G_{\text{шн}}^{(n)} = 0$, $Y_{\text{кор}}^{(n)} = 0$,

а также соответствующие сигнальные параметры $y_{11}^{(n)} = Y$, $y_{12}^{(n)} = -Y$, $y_{21}^{(n)} = Y$ и $y_{22}^{(n)} = -Y$, по формулам табл. 3.3, группа $I-I$, найдем результирующие шумовые параметры:

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = \frac{R_{\text{шн}} a |f_{21}|^2 + G_{\text{ш}} |f_{22}|^2}{|f_{21} - f_{22} Y|^2}, \quad (3.19)$$

$$G_{\text{шн}}^{(p)} = G_{\text{шн}} + \frac{R_{\text{шн}} a G_{\text{ш}} |Y_{\text{кор}} f_{22} - f_{21} - \Delta f|^2}{R_{\text{шн}} a |f_{21}|^2 + G_{\text{ш}} |f_{22}|^2}, \quad (3.20)$$

$$Y_{\text{кор}}^{(p)} = Y_{\text{кор}} - \frac{(R_{\text{шн}} a f_{21}^* Y + G_{\text{ш}} f_{22}^*) (Y_{\text{кор}} f_{22} - f_{21} - \Delta f)}{R_{\text{шн}} a |f_{21}|^2 + G_{\text{ш}} |f_{22}|^2}, \quad (3.21)$$

где $Y = \frac{\omega^2 C^2 R}{\omega^2 C^2 R^2 + 1} + i \frac{\omega C}{\omega^2 C^2 R^2 + 1}$; $G_{\text{ш}} = \frac{\omega^2 C^2 R_{\text{ш}}}{\omega^2 C^2 R^2 + 1}$.

Операционный усилитель с ООС последовательно-параллельного типа. Смешанная отрицательная обратная связь по току и напряжению возникает при соединении операционного усилителя и RC -цепи по схеме рис. 3.8а. Представим соединение в виде последовательно-параллельно включенных операционного усилителя и RC -четырехполюсника (рис. 3.9б). Шумовые параметры послед-

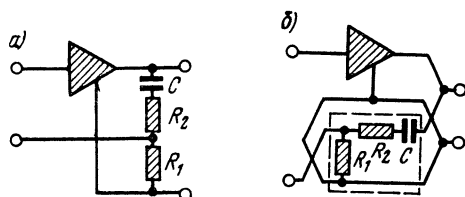


Рис. 3.9. Операционный усилитель с ООС по току и напряжению (а), представленный в виде последовательно-параллельного соединения с пассивным четырехполюсником (б)

него находим из табл. 2.12 (при $1/\omega C_1 = 0$): $R_{шн}^{(n)} = R_{ш1}R_{ш2}/(R_{ш1} + R_{ш2})$, $G_{шa}^{(n)} = (R_{ш1} + R_{ш2})/R_1^2$, $Z_{кор} = R_1R_{ш2}/(R_{ш1} + R_{ш2})$; сигнальные определим по формулам $h_{11}^{(n)} = Z_1Z_2/(Z_1 + Z_2)$, $h_{12}^{(n)} = Z_1/(Z_1 + Z_2)$, $h_{21}^{(n)} = Z_1/(Z_1 + Z_2)$, $h_{22}^{(n)} = -1/(Z_1 + Z_2)$.

Воспользовавшись формулами табл. 3.3, группа $U-I$, найдем первичные шумовые параметры соединения:

$$G_{шa}^{(p)} = \frac{G_{шa} |f_{21}(Z_1 + Z_2)|^2 + R_{ш12} |\Delta f|^2}{|f_{21}(Z_1 + Z_2) + Z_1 \Delta f|^2}, \quad (3.22)$$

$$R_{шн}^{(p)} = R_{шн} + \frac{1}{R_{ш12}} \left[R_{ш1}R_{ш2} + \frac{G_{шa} |Z_{кор} \Delta f - f_{22}| R_{ш12}}{G_{шa} |f_{21}(Z_1 + Z_2)|^2 + R_{ш12} |\Delta f|^2} \rightarrow \rightarrow - (Z_1R_{ш2} - R_{ш1}Z_2) f_{21} |^2 \right], \quad (3.23)$$

$$Z_{кор}^{(p)} = Z_{кор} + \frac{1}{R_{ш12}} \left\{ R_1R_{ш2} + \frac{[G_{шa} f_{21}^* (Z_1 + Z_2) Z_1^* - R_{ш12} \Delta f^*] \times \rightarrow \rightarrow \times [(Z_{кор} \Delta f - f_{22}) R_{ш12} - (Z_1R_{ш2} - R_{ш1}Z_2) f_{21}] \right\}, \quad (3.24)$$

где $Z_1 = R_1$, $Z_2 = R_2 - i \frac{1}{\omega C_2}$, $R_{ш12} = R_{ш1} + R_{ш2}$.

Операционный усилитель с ООС параллельно-последовательного типа. Смешанная отрицательная обратная связь по напряжению и току возникает при подключении RC -цепи по схеме рис. 3.10а. Соединение такого вида

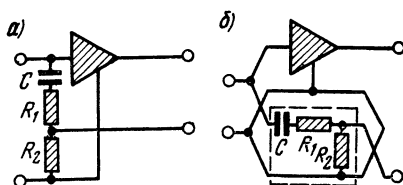


Рис. 3.10. Операционный усилитель с ООС по напряжению и току (а), представленный в виде параллельно-последовательного соединения с пассивным четырехполюсником (б)

представляет собой параллельно-последовательное включение операционного усилителя и пассивного RC -четырехполюсника (рис. 3.10б).

Определив шумовые параметры пассивной цепи:

$R_{ш a}^{(n)} = (G_{ш1} + G_{ш2})/|Y_1|^2$, $G_{шн}^{(n)} = G_{ш1}G_{ш2}/(G_{ш1} + G_{ш2})$, $Y_{кор}^{(n)} = Y_1G_{ш2}/(G_{ш1} + G_{ш2})$ и сигнальные $f_{11}^{(n)} = 1/(Z_1 + Z_2)$, $f_{12}^{(n)} = Z_2/(Z_1 + Z_2)$, $f_{21}^{(n)} = Z_2/(Z_1 + Z_2)$, $f_{22}^{(n)} = -Z_1Z_2/(Z_1 + Z_2)$, найдем результирующие параметры:

$$R_{ш a}^{(p)} = \frac{R_{ш a} |f_{21}(Y_1 + Y_2)|^2 + G_{ш12}}{|f_{21}(Y_1 + Y_2) - Y_1|^2}, \quad (3.25)$$

$$G_{шн}^{(p)} = G_{шн} + \frac{1}{G_{ш12}} \left[G_{ш1}G_{ш2} + \frac{R_{ш a} |(Y_{кор} - f_{11})G_{ш12} + \rightarrow}{R_{ш a} |f_{21}(Y_1 + Y_2)|^2 + G_{ш12}} \rightarrow + (Y_1G_{ш2} - G_{ш1}Y_2)f_{21}|^2 \right], \quad (3.26)$$

$$Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор} + \frac{1}{G_{ш12}} \left\{ Y_1G_{ш2} - \frac{[R_{ш a} f_{21}^*(Y_1 + Y_2)^*Y_1 + \rightarrow}{R_{ш a} |f_{21}(Y_1 + Y_2)|^2 + G_{ш12}} \rightarrow + G_{ш12} [(Y_{кор} - f_{11})G_{ш12} + (Y_1G_{ш2} - G_{ш1}Y_2)f_{21}] \right\}, \quad (3.27)$$

где

$$Y_1 = \frac{\omega^2 C^2 R_1}{\omega^2 C^2 R_1^2 + 1} + i \frac{\omega C}{\omega^2 C^2 R_1^2 + 1}, \quad Y_2 = \frac{1}{R_2}, \quad G_{ш1} = \frac{\omega^2 C^2 R_{ш1}}{\omega^2 C^2 R_1^2 + 1} \text{ и } G_{ш2} = \frac{R_{ш2}}{R_2^2}, \quad G_{ш12} = G_{ш1} + G_{ш2}.$$

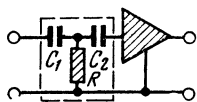


Рис. 3.11. Операционный усилитель с RC -цепью на входе

Операционный усилитель с RC -цепью на входе. Включенный на входе операционного усилителя RC -четыреполюсник образует с ним ступенчатое соединение (рис. 3.11), параметры которого известны из предыдущего раздела.

По формулам табл. 3.3 (группа ПА) найдем:

$$G_{шa}^{(p)} = \frac{R_{ш2} + R_{шн} + G_{шa} |Z_2 + Z_3 + Z_{кор}|^2}{|Z_2|^2}, \quad (3.28)$$

$$R_{шн}^{(p)} = \frac{R_{шн} (R_{ш2} + G_{шa} |Z_2|^2) + G_{шa} R_{ш2} |Z_3 + Z_{кор}|^2}{R_{ш2} + R_{шн} + G_{шa} |Z_2 + Z_3 + Z_{кор}|^2}, \quad (3.29)$$

$$Z_{кор}^{(p)} = Z_1 + Z_2 \frac{R_{шн} + G_{шa} (Z_2 + Z_3 + Z_{кор})^* (Z_3 + Z_{кор})}{R_{ш2} + R_{шн} + G_{шa} |Z_2 + Z_3 + Z_{кор}|^2}, \quad (3.30)$$

где $Z_1 = -i \frac{1}{\omega C_1}$, $Z_2 = R$ и $Z_3 = -i \frac{1}{\omega C_2}$.

Полученные результирующие параметры далее используются для расчета других шумовых величин, ограничиваемых условиями задачи.

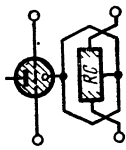
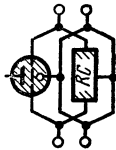
3.3. РАСЧЕТ ШУМОВ ЦЕПЕЙ С ЭЛЕКТРОННЫМИ ЛАМПАМИ

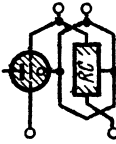

Электронные лампы по мере развития полупроводниковой электроники постепенно утрачивают свое значение. Поэтому, опустив вывод расчетных соотношений, приведем лишь формулы для основных соединений электронной лампы и RC -четыреполюсника (табл. 3.3). Они получены с использованием системы сигнальных y -параметров.

3.4. РАСЧЕТ ШУМОВ ЦЕПЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СТРУКТУРЫ



В число неотложных задач, выдвинутых практикой микроминиатюризации, входят изыскание принципов и возможностей реализации уравновешенных активных схем без применения трансформаторов и повышение мощностных характеристик функциональных устройств на базе элементов с низкими энергетическими показателями [1, 32, 33]. Решение этих задач неразрывно связано с преобразованием токов, напряжений и сопротивлений (проводимостей). При выдвинутых условиях эти преобразования могут быть выполнены при помощи активных

Таблица 3.3

Тип цепи	Схема соединения	Пара-метр	Формулы результирующих шумовых параметров
$U - U$		$G_{\text{шд}}^{(p)}$	$\frac{G_{\text{шд}}^{(a)} y_{21} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} \Delta y_{21} ^2}{ y_{21} - \Delta y_{21} }$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шд}}^{(a)} + R_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{G_{\text{шд}}^{(a)} G_{\text{шд}}^{(n)} (Z_{\text{кор}}^{(a)} \Delta y - y_{22}) z_{21} + (Z_{\text{кор}}^{(n)} - z_{11}) y_{21} ^2}{G_{\text{шд}}^{(a)} y_{21} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} \Delta y_{21} ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_{\text{кор}}^{(a)} + Z_{\text{кор}}^{(n)} - \frac{(G_{\text{шд}}^{(a)} y_{21}^* + G_{\text{шд}}^{(n)} \Delta y^* z_{21}) [(Z_{\text{кор}}^{(a)} \Delta y - y_{22}) z_{21} + (Z_{\text{кор}}^{(n)} - z_{11}) y_{21}]}{G_{\text{шд}}^{(a)} y_{21} ^2 + G_{\text{шд}}^{(n)} \Delta y_{21} ^2}$
$I - I$		$R_{\text{шд}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{шд}}^{(a)} y_{21} \Delta z ^2 + R_{\text{шд}}^{(n)} z_{21} ^2}{ y_{21} \Delta z - z_{21} ^2}$
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(a)} + G_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{R_{\text{шд}}^{(a)} R_{\text{шд}}^{(n)} (Y_{\text{кор}}^{(a)} - y_{11}) z_{21} + (Y_{\text{кор}}^{(n)} \Delta z - z_{22}) y_{21} ^2}{R_{\text{шд}}^{(a)} y_{21} \Delta z ^2 + R_{\text{шд}}^{(n)} z_{21} ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_{\text{кор}}^{(a)} + Y_{\text{кор}}^{(n)} - \frac{(R_{\text{шд}}^{(a)} y_{21}^* \Delta z^* + R_{\text{шд}}^{(n)} z_{21}^*) [(Y_{\text{кор}}^{(a)} - y_{11}) z_{21} + (Y_{\text{кор}}^{(n)} - z_{22}) y_{21}]}{R_{\text{шд}}^{(a)} y_{21} \Delta z ^2 + R_{\text{шд}}^{(n)} z_{21} ^2}$

Тип цепи	Схема соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров
U — I		$G_{\text{ша}}^{(a)}$	$\frac{G_{\text{ша}}^{(a)} y_{21} z_{22} ^2 + G_{\text{ша}}^{(n)} y_{11} z_{21} ^2}{ y_{21} z_{22} - y_{11} z_{21} ^2}$
		$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(a)} + R_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{G_{\text{ша}}^{(a)} G_{\text{ша}}^{(n)} (Z_{\text{кор}}^{(a)} y_{11} - 1) z_{21} + (Z_{\text{кор}}^{(n)} z_{22} - \Delta z) y_{21} ^2}{G_{\text{ша}}^{(a)} y_{21} z_{22} ^2 + G_{\text{ша}}^{(n)} y_{11} z_{21} ^2}$
		$Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$Z_{\text{кор}}^{(a)} + Z_{\text{кор}}^{(n)} - \frac{(G_{\text{ша}}^{(a)} y_{21} z_{22}^* + G_{\text{ша}}^{(n)} y_{11} z_{21}^*) [(Z_{\text{кор}}^{(a)} y_{11} - 1) z_{21} + (Z_{\text{кор}}^{(n)} z_{22} - \Delta z) y_{21}]}{G_{\text{ша}}^{(a)} y_{21} z_{22} ^2 + G_{\text{ша}}^{(n)} y_{11} z_{21} ^2}$
I — U		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\frac{R_{\text{ша}}^{(a)} y_{21} z_{11} ^2 + R_{\text{ша}}^{(n)} y_{22} z_{21} ^2}{ y_{21} z_{11} - y_{22} z_{21} ^2}$
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(a)} + G_{\text{шн}}^{(n)} + \frac{R_{\text{ша}}^{(a)} R_{\text{ша}}^{(n)} (Y_{\text{кор}}^{(a)} y_{22} - \Delta y) z_{21} + (Y_{\text{кор}}^{(n)} z_{11} - 1) y_{21} ^2}{R_{\text{ша}}^{(a)} y_{21} z_{11} ^2 + R_{\text{ша}}^{(n)} y_{22} z_{21} ^2}$
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$Y_{\text{кор}}^{(a)} + Y_{\text{кор}}^{(n)} - \frac{(R_{\text{ша}}^{(a)} y_{21} z_{11}^* + R_{\text{ша}}^{(n)} y_{22} z_{21}^*) [(Y_{\text{кор}}^{(a)} y_{22} - \Delta y) z_{21} + (Y_{\text{кор}}^{(n)} z_{11} - 1) y_{21}]}{R_{\text{ша}}^{(a)} y_{21} z_{11} ^2 + R_{\text{ша}}^{(n)} y_{22} z_{21} ^2}$

Окончание табл. 3.8

Тип цепи	Схема соединения	Пара-метр	Формулы результирующих шумовых параметров
АП		$G_{ша}^{(p)}$	$G_{ша}^{(a)} + (R_{шн}^{(n)} \Delta y ^2 + G_{ша}^{(n)} Z_{кор}^{(n)} \Delta y - y_{11} ^2) y_{21} ^{-2}$
		$R_{шн}^{(a)}$	$\frac{G_{ша}^{(a)} R_{шн}^{(n)} Z_{кор}^{(a)} \Delta y - y_{22} ^2 + G_{ша}^{(n)} R_{шн}^{(n)} y_{13} ^2 + G_{ша}^{(a)} G_{шн}^{(n)} Z_{кор}^{(n)} y_{22} - 1 }{R_{шн}^{(a)} + G_{ша}^{(a)} y_{21} ^2 + G_{ша}^{(n)} Z_{кор}^{(n)} \Delta y - y_{11} ^2 + R_{шн}^{(n)} \Delta y ^2} \rightarrow - (Z_{кор}^{(n)} \Delta y - y_{11}) Z_{кор}^{(a) 2}$
		$Z_{кор}^{(p)}$	$\frac{R_{шн}^{(n)} \Delta y^* (Z_{кор}^{(a)} \Delta y - y_{22}) - G_{ша}^{(n)} (Z_{кор}^{(n)*} \Delta y^* - y_{11}) [(Z_{кор}^{(n)} y_{22} - 1) \rightarrow - Z_{кор}^{(a)} y_{21} ^2 + G_{ша}^{(n)} Z_{кор}^{(n)} \Delta y - y_{11} ^2 + R_{шн}^{(n)} \Delta y ^2]}{G_{ша}^{(a)} y_{21} ^2 + G_{ша}^{(n)} Z_{кор}^{(n)} \Delta y - y_{11} ^2 + R_{шн}^{(n)} \Delta y ^2} \rightarrow - (Z_{кор}^{(n)} \Delta y - y_{11}) Z_{кор}^{(a)}$
		$R_{ша}^{(p)}$	$R_{ша}^{(n)} + (G_{шн}^{(a)} \Delta z ^2 + R_{ша}^{(a)} Y_{кор}^{(a)} \Delta z - z_{11} ^2) z_{21} ^{-2}$
ПА		$G_{шн}^{(p)}$	$G_{шн}^{(n)} + \frac{R_{шн}^{(n)} G_{шн}^{(a)} Y_{кор}^{(n)} \Delta z - z_{22} ^2 + R_{ша}^{(a)} G_{шн}^{(a)} z_{12} ^2 + R_{ша}^{(n)} R_{ша}^{(a)} \times \rightarrow \frac{R_{шн}^{(n)} z_{21} ^2 + R_{ша}^{(a)} Y_{кор}^{(a)} \Delta z - z_{11} ^2 + G_{шн}^{(a)} \Delta z ^2}{\times \rightarrow (Y_{кор}^{(n)} z_{22} - 1) - (Y_{кор}^{(a)} \Delta z - z_{11}) Y_{кор}^{(n) 2}}$
		$Y_{кор}^{(p)}$	$\frac{G_{шн}^{(a)} \Delta z^* (Y_{кор}^{(n)} \Delta z - z_{22}) - R_{ша}^{(a)} (Y_{кор}^{(a)*} \Delta z^* - z_{11}) [(Y_{кор}^{(a)} z_{22} - 1) \rightarrow - R_{шн}^{(n)} z_{21} ^2 + R_{ша}^{(a)} Y_{кор}^{(a)} \Delta z - z_{11} ^2 + G_{шн}^{(a)} \Delta z ^2]}{Y_{кор}^{(n)} + \rightarrow - (Y_{кор}^{(a)} \Delta z - z_{11}) Y_{кор}^{(n)}}$

элементов. Для этого они соединяются так, что подводящий к ним сигнал распределяется между всеми активными элементами — каждый из них получает часть энергии, а на выходе отдает в общую суммирующую нагрузку. Соединения подобного вида, исходя из существа протекающих в них процессов, назовем *цепями распределенной передачи энергии*.

В зависимости от вида соединения происходит распределение токов или напряжений на стороне подключения источника сигнала либо нагрузки. Если имеет место двустороннее распределение напряжений, то соединение, при помощи которого оно достигается, представляет цепь типа $U-U$, при двустороннем распределении тока — типа $I-I$, при распределении напряжения с одной стороны и тока с другой — типа $U-I$ или $I-U$.

Цепь распределенной передачи энергии может содержать любое μ число неоднотипных или одинаковых четырехполюсников, которые в общем случае отличаются параметрами, а в частном — идентичны. Рассмотрим основные типы цепей распределенной передачи энергии и определим метод расчета их собственных шумов, базируясь на соотношениях между сигнальными и шумовыми параметрами сложных соединений четырехполюсников.

Цепи типа $U-U$. Образуются из включенных последовательно четырехполюсников и представляют одну из разновидностей соединения в обобщенном виде, рассмотренного в [35]. Шумовые параметры цепи рассчитываются в системе z -параметров. Транзисторная цепь $U-U$ изображена на рис. 3.12а. Если транзисторов свыше двух ($\mu > 2$), соединение приводится к регулярному включением элементов развязки.

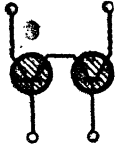
Для расчета шумовых параметров s -го четырехполюсника воспользуемся соотношениями


$$z_{11}^{(s)} = (\Delta h/h_{22})^{(s)}, \quad z_{12}^{(s)} = (h_{12}/h_{22})^{(s)}, \quad z_{21}^{(s)} = (-h_{21}/h_{22})^{(s)}, \quad z_{22}^{(s)} = (1/h_{22})^{(s)},$$

после подстановки которых получим формулы, сведенные в табл. 3.4, группа $U-U$.

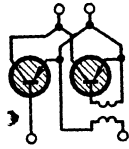
Напряжения между выводами s -го транзистора, входящего в соединение, определяются с учетом зависимости между параметрами z и h систем. Входное и выходное сопротивления цепей типа $U-U$ превосходят соответствующие величины отдельно взятого элемента. Такие цепи эффективны при источнике сигнала с большим внутрен-

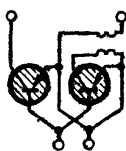
Таблица 3.4

Тип цепи	Вид соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров	
			неидентичные транзисторы	идентичные
 $U - U$		$G_{ша}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} G_{ша}^{(s)} \left \left(-\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)} \right ^2 \left \sum_{s=1}^{\mu} \left(-\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)} \right ^{-2}$	$\mu^{-1} G_{ша}$
		$R_{шн}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} \left[R_{шн}^{(s)} + G_{ша}^{(s)} \left Z_{кор}^{(s)} - \left(\frac{\Delta h}{h_{22}} \right)^{(s)} \right ^2 \right] - \left \sum_{s=1}^{\mu} G_{ша}^{(s)} \left(-\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)*} \right \times$ $\times \left[Z_{кор}^{(s)} - \left(\frac{\Delta h}{h_{22}} \right)^{(s)} \right]^2 \left \sum_{s=1}^{\mu} G_{ша}^{(s)} \left \left(-\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)} \right ^2 \right ^{-1} \right]$	$\mu R_{шн}$
		$Z_{кор}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} \left(\frac{\Delta h}{h_{22}} \right)^{(s)} + \sum_{s=1}^{\mu} \left(-\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} G_{ша}^{(s)} \left(-\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)*} \left[Z_{кор}^{(s)} - \right.$ $\left. - \left(\frac{\Delta h}{h_{22}} \right)^{(s)} \right] \left[\sum_{s=1}^{\mu} G_{ша}^{(s)} \left \left(-\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)} \right ^2 \right]^{-1} \right]$	$\mu Z_{кор}$

Тип цепи	Вид соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров	
			неидентичные трансисторы	идентичные
I — I		$R_{ша}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} R_{ша}^{(s)} \left \left(\frac{h_{21}}{h_{11}} \right)^{(s)} \right ^2 \left \sum_{s=1}^{\mu} \left(\frac{h_{21}}{h_{11}} \right)^{(s)} \right ^{-2}$	$\mu^{-1} R_{ша}$
		$G_{шн}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} G_{шн}^{(s)} + \sum_{s=1}^{\mu} R_{ша}^{(s)} \left Y_{кор}^{(s)} - \left(\frac{1}{h_{11}} \right)^{(s)} \right ^2 - \left \sum_{s=1}^{\mu} R_{ша}^{(s)} \left(\frac{h_{21}}{h_{11}} \right)^{(s)*} \right \left[Y_{кор}^{(s)} - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\frac{1}{h_{11}} \right)^{(s)} \right] \right \left[\sum_{s=1}^{\mu} R_{ша}^{(s)} \left \left(\frac{h_{21}}{h_{11}} \right)^{(s)} \right ^2 \right]^{-1}$	$\mu G_{шн}$
		$Y_{кор}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} \left(\frac{1}{h_{11}} \right)^{(s)} + \sum_{s=1}^{\mu} \left(\frac{h_{21}}{h_{11}} \right)^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} R_{ша}^{(s)} \left(\frac{h_{21}}{h_{11}} \right)^{(s)*} \left[Y_{кор}^{(s)} - \right. \\ \left. - \left(\frac{1}{h_{11}} \right)^{(s)} \right] \left[\sum_{s=1}^{\mu} R_{ша}^{(s)} \left \left(\frac{h_{21}}{h_{11}} \right)^{(s)} \right ^2 \right]^{-1}$	$\mu Y_{кор}$

4* Продолжение табл. 3.4

Тип цепи	Вид соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров	
			неидентичные транзисторы	идентичные
 $U \leftarrow I$		$G_{ша}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} G_{ша}^{(s)} h_{21}^{(s)} ^2 \left \sum_{s=1}^{\mu} h_{21}^{(s)} \right ^{-2}$	$\mu^{-1} G_{ша}$
		$R_{шн}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} (R_{шн}^{(s)} + G_{ша}^{(s)} Z_{кор}^{(s)} - h_{11}^{(s)} ^2) - \left \sum_{s=1}^{\mu} G_{ша}^{(s)} h_{21}^{(s)*} (Z_{кор}^{(s)} - h_{11}^{(s)}) \right ^2 \times$ $\times \left(\sum_{s=1}^{\mu} G_{ша}^{(s)} h_{21}^{(s)} ^2 \right)^{-1}$	$\mu R_{шн}$
		$Z_{кор}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} h_{11}^{(s)} + \sum_{s=1}^{\mu} h_{21}^{(s)} \sum_{s=1}^{\mu} G_{ша}^{(s)} h_{21}^{(s)*} (Z_{кор}^{(s)} - h_{11}^{(s)}) \left(\sum_{s=1}^{\mu} G_{ша}^{(s)} h_{21}^{(s)} ^2 \right)^{-1}$	$\mu Z_{кор}$

Тип цепи	Вид соединения	Параметр	Формулы результирующих шумовых параметров	
			неидентичные транзисторы	идентичные
 $I - U$		$R_{\text{ша}}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ша}}^{(s)} \left \left(-\frac{h_{21}^{(s)}}{\Delta h} \right)^2 \right \left \sum_{s=1}^{\mu} \left(-\frac{h_{21}^{(s)}}{\Delta h} \right)^{(s)} \right ^{-2}$	
		$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} \left[G_{\text{шн}}^{(s)} + R_{\text{ша}}^{(s)} \left Y_{\text{кор}}^{(s)} - \left(\frac{h_{22}^{(s)}}{\Delta h} \right)^* \right \right] - \left \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ша}}^{(s)} \left(-\frac{h_{21}^{(s)}}{\Delta h} \right)^{(s)*} \left[Y_{\text{кор}}^{(s)} - \left(\frac{h_{22}^{(s)}}{\Delta h} \right)^* \right] \right ^{-1}$	
		$Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$\sum_{s=1}^{\mu} \left(\frac{h_{22}^{(s)}}{\Delta h} \right)^{(s)} + \sum_{s=1}^{\mu} \left(-\frac{h_{21}^{(s)}}{\Delta h} \right)^{(s)} \left \sum_{s=1}^{\mu} R_{\text{ша}}^{(s)} \left(-\frac{h_{21}^{(s)}}{\Delta h} \right)^{(s)*} \left[Y_{\text{кор}}^{(s)} - \left(\frac{h_{22}^{(s)}}{\Delta h} \right)^* \right] \right ^{-1}$	

ним сопротивлением (источнике тока) и высокоомной нагрузке.

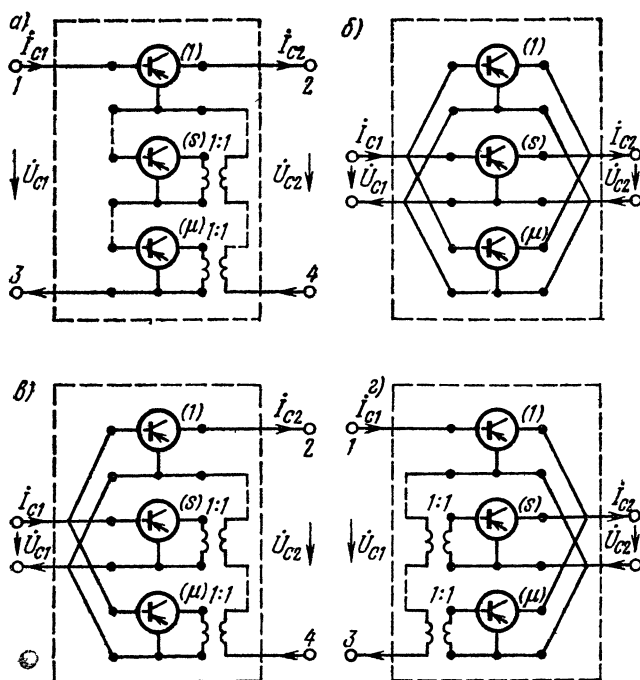


Рис. 3.12. Транзисторные цепи распределенной передачи энергии:

а) типа $U-U$, б) типа $I-I$, в) типа $I-U$, г) типа $U-I$

Цепи типа $I-I$. Образуются из включенных параллельно четырехполюсников и являются разновидностью соединения, рассмотренного в [35]. Шумовые параметры соединения этого типа рассчитываются в системе y -параметров.

Транзисторная цепь типа $I-I$ изображена на рис. 3.12б, регулярность ее сохраняется при любом количестве элементов в соединении.

Для расчета шумовых параметров воспользуемся соотношениями $y_{11}^{(s)} = (1/h_{11})^{(s)}$, $y_{12}^{(s)} = (-h_{12}/h_{11})^{(s)}$, $y_{21}^{(s)} = (h_{21}/h_{11})^{(s)}$, $y_{22}^{(s)} = (\Delta h/h_{11})^{(s)}$,

после подстановки которых получим формулы, сведенные в табл. 3.4, группа $I—I$.

Токи между выводами s -го транзистора, входящего в соединение, определяются с использованием соответствующих пересчетных соотношений. Входное и выходное сопротивления цепей типа $I—I$ меньше соответствующих величин любого из элементов соединения. Такие цепи эффективны при источнике сигнала с низким внутренним сопротивлением (источнике напряжения) и низкоомной нагрузке.

Цепи типа $U—I$. Образуются из четырехполюсников, соединенных последовательно на входе и параллельно на выходе, и представляют один из вариантов последовательно-параллельного соединения. Шумовые параметры соединения этого типа рассчитываются в системе h -параметров. Транзисторная цепь типа $U—I$ изображена на рис. 3.12г, регулярность ее достигается использованием гальванической развязки на выходе второго и последующих транзисторов.

Для расчета шумовых параметров цепи воспользуемся общими выражениями [35], подставив в них h -параметры транзисторов. Полученные формулы сведены в табл. 3.4, группа $U—I$.

Сигнальные токи и напряжения в s -м транзисторе соединения определяются общими соотношениями [35]. Входное сопротивление цепей типа $I—U$ выше соответствующих величин любого из элементов, выходное же, наоборот, ниже. Такие цепи эффективны при источнике сигнала с высоким внутренним сопротивлением и низкоомной нагрузке.

Цепи типа $I—U$. Образуются из четырехполюсников, включенных параллельно на входе и последовательно на выходе, и представляют один из вариантов параллельно-последовательного соединения [35]. Шумовые параметры этого типа соединений рассчитываются в системе f -параметров. Транзисторная цепь типа $I—U$ изображена на рис. 3.14в, регулярность ее достигается развязками на входе транзисторов, начиная со второго и последующих.

Для расчета шумовых параметров воспользуемся зависимостями между системами f - и h -параметров: $f_{11}^{(s)} = 1/(h_{22}/\Delta h)^{(s)}$, $f_{12}^{(s)} = (-h_{12}/\Delta h)^{(s)}$, $f_{21}^{(s)} = (-h_{21}/\Delta h)^{(s)}$, $f_{22}^{(s)} = (h_{11}/\Delta h)^{(s)}$; в результате получим формулы, сведенные в табл. 3.4, группа $I—U$.

Сигнальные токи и напряжения в s -м транзисторе, входящем в соединение, определяются из [35]. Входное сопротивление цепей типа $I-U$ ниже соответствующих величин любого из входящих в соединение элементов, а выходное — соответственно выше. Такие цепи эффективны при источнике сигнала с низким внутренним сопротивлением и при высокоомной нагрузке.

Примером использования цепей распределенной передачи энергии являются реализации уравнишенных бестрансформаторных цепей с помощью соединений типов

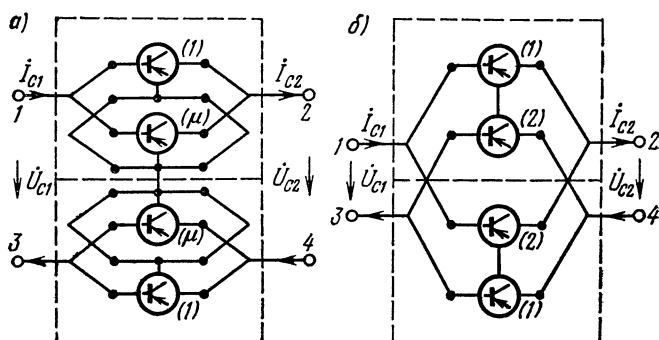


Рис. 3.13. Транзисторные уравнишенные цепи:
а) типа $U-I$ $I-U$, б) типа $I-U$ $U-I$

$U-I$ $I-U$ и $I-U$ $U-I$, представленных на рис. 3.13. Они получены на базе структур типов $U-U$, $I-I$ и могут состоять из любого числа μ транзисторов. В зависимости от заданных условий последние включаются по схеме с общей базой, эмиттером или коллектором. При необходимости параметры одной схемы пересчитываются в другую [3, 15, 35].

ПОРЯДОК РАСЧЕТА ШУМОВ МНОГОКАСКАДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

4.1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Полученные обобщенные формулы и соотношения позволяют выработать определенную методику расчета шумов линейных цепей и оптимизации их по критерию шумозащищенности. В качестве примера рассмотрим усилительные схемы с общими отрицательными обратными связями. Но прежде, во избежание повторений и неясностей, оговорим ряд условий, которых будем придерживаться в последующем.

1. В качестве основной «неделимой единицы» на уровне структурной схемы примем усилительный каскад, в общем случае состоящий из активного элемента и обеспечивающие его нормальное функционирование (постоянное смещение, температурная стабилизация и т. д.) пассивных цепей. Многообразие форм соединений и сочетаний активных элементов с пассивными в усилительном каскаде практически исключает возможность рассмотрения здесь всех вариантов. Поэтому в упрощенную модель усилительного каскада на транзисторе введен один пассивный элемент (во входной цепи), шумы которого наиболее опасны. К нему могут быть приведены источники шума всех составляющих.

2. Объектом рассмотрения выберем схему трехкаскадного усилителя, весьма распространенную на практике благодаря известным ее достоинствам, одно из которых состоит в наиболее благоприятных условиях осуществления общей отрицательной связи. Крайне опасная с точки зрения устойчивости усилителя взаимосвязь входных и выходных цепей здесь приводит к повышению глубины общей отрицательной обратной связи. Избыток общего усиления позволяет также варьировать местными обратными связями в каскадах [3, 4, 22].

3. Порядок расчета шумов определим для пяти основных схем трехкаскадных усилителей, различающихся

общей обратной связью. Первоначально рассмотрим трехкаскадный усилитель без ООС, а затем построенные на его основе модели с ООС последовательного, параллельного, последовательно-параллельного, параллельно-последовательного типов. Последние не исключают наличия местных ООС в усилительных каскадах. Рассматриваемые вначале схемы двух вариантов транзисторных усилителей — неуравновешенная и уравновешенная — учитывают особенности микроминиатюризации, методами которой пока не удастся осуществить высокого качества трансформаторы. Оба усилителя могут быть охвачены ООС, поэтому в последующем рассматривается только первая (для второй цепь ООС выполняется по симметричной схеме).

4. В каждой из усилительных схем шумовые показатели рассчитываются с учетом источников флуктуаций всех каскадов и цепи ООС, при пренебрежении шумами последних двух и только с учетом шумов первого каскада. Выбор приближения зависит от предъявляемых к усилителю требований, особенностей усилительных каскадов: способа включения активных элементов, величины усиления, состава элементов в цепи отрицательной обратной связи, ее глубины и т. д.

5. В рассматриваемых усилителях на транзисторах преднамеренно не оговариваются способы их включения и используемые типы (хотя в своей основе приведенные схемы построены из ориентации на включение транзисторов по схеме с общим эмиттером). В зависимости от способа включения и типа транзистора в формулы подставляются соответствующие параметры. Во всех случаях предполагается выполнение необходимых для достижения ООС условий. В принципе же, обобщенные соотношения остаются справедливыми и для положительной обратной связи, например, используемой в генераторных схемах.

6. Предлагаемая методика предназначена в основном для «ручных» расчетов и для вычислений на ЭВМ с «малой» памятью. Поэтому принимаемые допущения (пренебрежение второстепенными источниками шума) приводят к весьма ощутимому упрощению общих расчетных выражений. Не исключается также возможность использования полученных соотношений для «встраивания» в программы расчета шумов обобщенных структур.

4.2. УСИЛИТЕЛИ БЕЗ ОБЩЕЙ ООС

Структурная схема трехкаскадного усилителя без ООС представлена на рис. 4.1. Штрихами помечены каскады, шумы которых учитываются при расчете: в схеме *а* принимаются во внимание все источники шума, в последующих учитываются шумы первых двух каскадов *б* или только первого *в*.

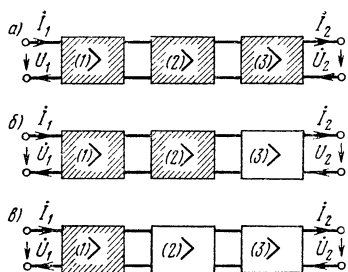


Рис. 4.1. Структурная схема усилителя:

а) учитывающая шумы трех каскадов, *б*) первого и второго, *в*) первого каскада

Вначале остановимся на расчете шумов усилителя, в котором не пренебрегается шумовыми источниками всех трех каскадов.

1. Собственно расчету предшествует получение достаточной информации об элементах усилителя—определение их сигнальных и шумовых параметров, а в осо-

бых условиях и выяснение режимных, температурных и других зависимостей, включая производственные разбросы. Полученные таким образом данные представляются, например, по форме табл. 4.1. При этом становятся оче-

Таблица 4.1

№ каскада	Тип элемента (цепи)	Параметры элемента (цепи)	
		сигнальные	шумовые
1	Активный элемент, пассивная цепь	Активные элементы в системах параметров: транзисторы— h	В системах параметров ¹⁾ $R_{шн}, G_{ша}, Z_{кор}$
2		электронные лампы— y	или
3		операционные усилители— f пассивные цепи— z или y	$G_{шн}, R_{ша}, Y_{кор}$

¹⁾ Определяющим обычно является активный элемент.

видными достаточность и совместимость исходных данных, а порядок величин позволяет при определенном опыте предугадывать в какой-то мере их влияние на результирующие показатели.

2. По полученным для активных и пассивных элементов данным с помощью соответствующих формул

табл. (3.1) — (3.3) рассчитываются параметры отдельных каскадов, которые также полезно представлять в наглядном виде, например, по форме табл. 4.2.

Таблица 4.2

№ каскада	Параметры каскада							Примечание
	сигнальные				шумовые ¹⁾			
1	$a_{11}^{(1)}$	$a_{12}^{(1)}$	$a_{21}^{(1)}$	$a_{22}^{(1)}$	$R_{\text{шн}}^{(1)}$ ($G_{\text{шн}}^{(1)}$)	$G_{\text{ша}}^{(1)}$ ($R_{\text{ша}}^{(1)}$)	$Z_{\text{кор}}^{(1)}$ ($Y_{\text{кор}}^{(1)}$)	¹⁾ для схем а, б, в
2	$a_{11}^{(2)}$	$a_{12}^{(2)}$	$a_{21}^{(2)}$	$a_{22}^{(2)}$	$R_{\text{шн}}^{(2)}$ ($G_{\text{шн}}^{(2)}$)	$G_{\text{ша}}^{(2)}$ ($R_{\text{ша}}^{(2)}$)	$Z_{\text{кор}}^{(2)}$ ($Y_{\text{кор}}^{(2)}$)	для схем а, б
3	$a_{11}^{(3)}$	$a_{12}^{(3)}$	$a_{21}^{(3)}$	$a_{22}^{(3)}$	$R_{\text{шн}}^{(3)}$ ($G_{\text{шн}}^{(3)}$)	$G_{\text{ша}}^{(3)}$ ($R_{\text{ша}}^{(3)}$)	$Z_{\text{кор}}^{(3)}$ ($Y_{\text{кор}}^{(3)}$)	для схемы а

¹⁾ Для расчета сигнальных и шумовых показателей ступенчатого соединения усилительных каскадов используется система a -параметров.

3. Располагая сигнальными и шумовыми показателями всех каскадов, рассчитываем результирующие шумовые параметры усилителя, предварительно определив их выражения при $\mu = 3$:

$$G_{\text{ша}}^{(p)} = G_{\text{ша}}^{(1)} + \sum_{s=2}^3 |a_{21}^{(s-1)(p)}|^2 R_{\text{шн}}^{(s)} + \sum_{s=2}^3 |a_{21}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}}^{(s)} + a_{22}^{(s-1)(p)}|^2 G_{\text{ша}}^{(s)}, \quad (4.1)$$

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}^{(1)} + |Z_{\text{кор}}^{(1)}|^2 G_{\text{ша}}^{(1)} + \sum_{s=2}^3 |a_{11}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}}^{(s)} + a_{12}^{(s-1)(p)}|^2 \times \\ \times G_{\text{ша}}^{(s)} + \sum_{s=2}^3 |a_{11}^{(s-1)(p)}|^2 R_{\text{шн}}^{(s)} - |Z_{\text{кор}}^{(1)} G_{\text{ша}}^{(1)} + \sum_{s=2}^3 a_{11}^{(s-1)(p)*} \times \\ \times a_{21}^{(s-1)(p)*} R_{\text{шн}}^{(s)} + \sum_{s=2}^3 (a_{21}^{(s-1)(p)*} Z_{\text{кор}}^{(s)*} + a_{22}^{(s-1)(p)*}) \times \\ \times (a_{11}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}}^{(s)} - a_{12}^{(s-1)(p)} G_{\text{ша}}^{(s)})^2 \left[G_{\text{ша}}^{(1)} + \sum_{s=2}^3 |a_{21}^{(s-1)(p)} Z_{\text{кор}}^{(s)} + \right.$$

$$+ a_{22}^{(s-1)(p)} |^2 G_{ш a}^{(s)} + \sum_{s=2}^3 |a_{21}^{(s-1)(p)}|^2 R_{шн}^{(s)}]^{-1}, \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} Z_{кор}^{(p)} = & \left[Z_{кор}^{(1)} G_{ш a}^{(1)} + \sum_{s=2}^3 (a_{21}^{(s-1)(p)*} Z_{кор}^{(s)*} + a_{22}^{(s-1)(p)*}) \times \right. \\ & \times (a_{11}^{(s-1)(p)} Z_{кор}^{(s)} + a_{12}^{(s-1)(p)}) G_{ш a}^{(s)} + \sum_{s=2}^3 a_{11}^{(s-1)(p)} a_{21}^{(s-1)(p)*} \times \\ & \times R_{шн}^{(s)} \left. \left[G_{ш a}^{(1)} + \sum_{s=2}^3 |a_{21}^{(s-1)(p)} Z_{кор}^{(s)} + a_{22}^{(s-1)(p)}|^2 G_{ш a}^{(s)} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \sum_{s=2}^3 |a_{21}^{(s-1)(p)}|^2 R_{шн}^{(s)} \right]^{-1} \right]. \end{aligned} \quad (4.3)$$

4. Полученные значения параметров позволяют при заданном источнике сигнала с внутренним сопротивлением Z_1 и сопротивлением нагрузки Z_2 рассчитать:

— коэффициент шума усилителя

$$F^{(p)} = \frac{R_{шн}^{(p)} + G_{ш a}^{(p)} |Z_1 + Z_{кор}^{(p)}|^2 + R_{ш2} |a_{21}^{(p)} Z_1 + a_{11}^{(p)}|^2}{R_{ш1}} + 1; \quad (4.4)$$

— оптимальный коэффициент шума

$$\begin{aligned} F_{опт}^{(p)} = & \frac{R_{шн}^{(p)} + G_{ш a}^{(p)} [(R_{1опт} + R_{кор}^{(p)})^2 + (X_1 + X_{кор}^{(p)})^2] + \rightarrow}{R_{1опт}} \\ & \rightarrow + R_{ш2} |(R_{1опт} + i X_1) a_{21}^{(p)} + a_{11}^{(p)}|^2 + 1, \end{aligned} \quad (4.5)$$

достигаемый при

$$R_{1опт} = \left(\frac{R_{шн}^{(p)} + G_{ш a}^{(p)} |i X_1 + Z_{кор}^{(p)}|^2 + R_{ш2} |i X_1 a_{21}^{(p)} + a_{11}^{(p)}|^2}{G_{ш a}^{(p)} + R_{ш2} |a_{21}^{(p)}|^2} \right)^{1/2}; \quad (4.6)$$

— минимальный коэффициент шума

$$\begin{aligned} F_{мин}^{(p)} = & \frac{R_{шн}^{(p)} + G_{ш a}^{(p)} (R_{1мин} + R_{кор}^{(p)})^2 + R_{ш2} |(R_{1мин} + i X_1) \times \rightarrow}{R_{1мин}} \\ & \rightarrow \times a_{21}^{(p)} + a_{11}^{(p)}|^2 + 1, \end{aligned} \quad (4.7)$$

достигаемый при $X_1 = -X_{кор}^{(p)}$ и

$$R_{1\text{мин}} = \frac{R_{\text{шн}}^{(p)} + G_{\text{ш а}}^{(p)} R_{\text{кор}}^{(p)^2} + R_{\text{шз}} |i X_1 a_{21}^{(p)} + a_{11}^{(p)}|^2}{G_{\text{ш а}}^{(p)} + R_{\text{шз}} |a_{21}^{(p)}|^2}, \quad (4.8)$$

Напомним, что для получения наименьшего коэффициента шума при ступенчатом соединении необходимо выполнение условий минимизации также для второго и третьего каскадов. Однако в большинстве практических случаев (при достаточно большом усилении первого каскада) оказывается достаточным шумовое сопряжение на входе первой ступени, где сигнал имеет минимальную величину. Также рассчитываются шумовые показатели усилителей с числом каскадов менее и более трех. Порядок расчета при этом сохраняется, табличная форма записи исходных и промежуточных данных оказывается также весьма полезной.

Из соображений общности в рассмотренном примере учитывались источники флуктуаций всех элементов усилителя, хотя обычно следующие за первым каскадом влияют на отношение сигнал/шум незначительно. Однако во избежание просчетов возможность пренебрежения теми или иными шумовыми составляющими следует определять в каждом конкретном случае, сообразуясь с условиями задачи и требуемой точностью расчетов.

При пренебрежении шумами одного или двух последующих каскадов шумовые параметры усилителя определяются по (4.1) — (4.3), но соответственно при $\mu = 2$ и $\mu = 1$:

— для шумящих первого и второго каскадов получим:

$$G_{\text{ш а}}^{(p)} = G_{\text{ш а}}^{(1)} + |a_{21}^{(1)}|^2 R_{\text{шн}}^{(2)} + |a_{21}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{22}^{(1)}|^2 G_{\text{ш а}}^{(2)}, \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} R_{\text{шн}}^{(p)} = & R_{\text{шн}}^{(1)} + |Z_{\text{кор}}^{(1)}|^2 G_{\text{ш а}}^{(1)} + |a_{11}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{12}^{(1)}|^2 G_{\text{ш а}}^{(2)} + \\ & + |a_{11}^{(1)}|^2 R_{\text{шн}}^{(2)} - |Z_{\text{кор}}^{(1)} G_{\text{ш а}}^{(1)} + a_{11}^{(1)*} a_{21}^{(1)*} R_{\text{шн}}^{(2)} + (a_{21}^{(1)*} Z_{\text{кор}}^{(2)*} + \\ & + a_{22}^{(1)*}) (a_{11}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(2)} - a_{12}^{(1)} G_{\text{ш а}}^{(2)})^2 [G_{\text{ш а}}^{(1)} + |a_{21}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(2)} + \\ & + a_{22}^{(1)}|^2 G_{\text{ш а}}^{(2)} + |a_{21}^{(1)}|^2 R_{\text{шн}}^{(2)}]^{-1}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{кор}}^{(p)} = & [Z_{\text{кор}}^{(1)} G_{\text{ш а}}^{(1)} + (a_{21}^{(1)*} Z_{\text{кор}}^{(2)*} + a_{22}^{(1)*}) (a_{11}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{12}^{(1)}) G_{\text{ш а}}^{(2)} + \\ & + a_{11}^{(1)} a_{21}^{(1)*} R_{\text{шн}}^{(2)}] [G_{\text{ш а}}^{(1)} + |a_{21}^{(1)} Z_{\text{кор}}^{(2)} + a_{22}^{(1)}|^2 G_{\text{ш а}}^{(2)} + \\ & + |a_{21}^{(1)}|^2 R_{\text{шн}}^{(2)}]^{-1}; \end{aligned} \quad (4.11)$$

— при учете шумов только первого каскада

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}^{(1)}, G_{\text{ша}}^{(p)} = G_{\text{ша}}^{(1)}, Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}}^{(1)}. \quad (4.12)$$

Трехкаскадный неуравновешенный усилитель на транзисторах представлен на рис. 4.2. Как и в общем случае, в схеме *а* учитываются шумы всех трех каска-

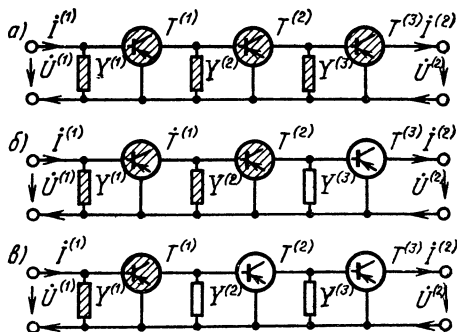


Рис. 4.2. Упрощенная схема транзисторного усилителя, учитывающая шумы:

а) трех каскадов, б) первого и второго, в) первого каскада

дов, в схеме *б* — первого и второго, в *в* — только первого. Исходными данными для расчета служат сигнальные и шумовые параметры элементов цепи (табл. 4.3), на

Таблица 4.3

№ каскада	Тип элемента (цепи)	Параметры элемента (цепи)						
		сигнальные				шумовые		
1	Транзистор $T^{(1)}$	$h_{11}^{(1)}$	$h_{12}^{(1)}$	$h_{21}^{(1)}$	$h_{22}^{(1)}$	$G_{\text{шн}}^{(1)}$	$R_{\text{ша}}^{(1)}$	$Y_{\text{кор}}^{(1)}$
	Пассивная цепь	$Y^{(1)}$	—	—	—	$G_{\text{ш}}^{(1)}$	—	$Y^{(1)}$
2	Транзистор $T^{(2)}$	$h_{11}^{(2)}$	$h_{12}^{(2)}$	$h_{21}^{(2)}$	$h_{22}^{(2)}$	$G_{\text{шн}}^{(2)}$	$R_{\text{ша}}^{(2)}$	$Y_{\text{кор}}^{(2)}$
	Пассивная цепь	$Y^{(2)}$	—	—	—	$G_{\text{ш}}^{(2)}$	—	$Y^{(2)}$
3	Транзистор $T^{(3)}$	$h_{11}^{(3)}$	$h_{12}^{(3)}$	$h_{21}^{(3)}$	$h_{22}^{(3)}$	$G_{\text{шн}}^{(3)}$	$R_{\text{ша}}^{(3)}$	$Y_{\text{кор}}^{(3)}$
	Пассивная цепь	$Y^{(3)}$	—	—	—	$G_{\text{ш}}^{(3)}$	—	$Y^{(3)}$

Таблица 4.4

№ каскада	Параметры каскада					
	сигнальные			шумовые		
1	$-\frac{\Delta h^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{h_{11}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(1)} Y^{(1)}) h_{22}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(1)} Y^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$G_{\text{шн}}^{(1)} \rightarrow G_{\text{ш}}^{(1)}$	$R_{\text{ша}}^{(1)} \quad Y^{(1)} \rightarrow Y^{(1)}_{\text{кор}}$
2	$-\frac{\Delta h^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{h_{11}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(2)} Y^{(2)}) h_{22}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(2)} Y^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$G_{\text{шн}}^{(2)} + G_{\text{ш}}^{(2)}$	$R_{\text{ша}}^{(2)} \quad Y^{(2)} \rightarrow Y^{(2)}_{\text{кор}}$
3	$-\frac{\Delta h^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{h_{11}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(3)} Y^{(3)}) h_{22}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(3)} Y^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$G_{\text{шн}}^{(3)} + G_{\text{ш}}^{(3)}$	$R_{\text{ша}}^{(3)} \quad Y^{(3)} \rightarrow Y^{(3)}_{\text{кор}}$

основании которых определяются аналогичные параметры усилительных каскадов, сведенные в табл. 4.4. Результирующие шумовые величины всего усилителя рассчитываются по (4.1) — (4.3), из которых выбираются соответствующие приемлемой степени приближения или без него.

Упрощенная схема уравнированного транзисторного усилителя представлена на рис. 4.3. Симметрия относи-

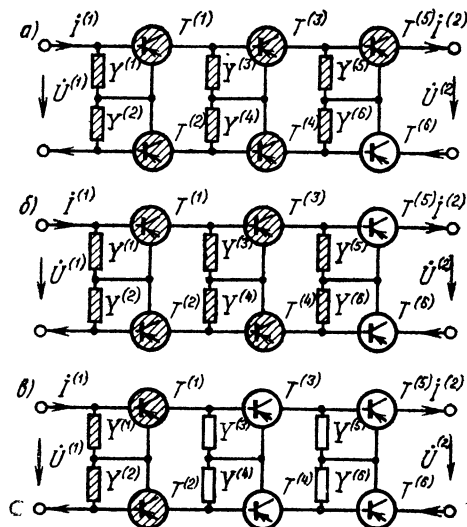


Рис 4.3. Упрощенная схема транзисторного уравнированного усилителя (бестрансформаторного), учитывая шумы: а) трех каскадов, б) первого и второго, в) первого каскада

тельно продольной оси в усилителе достигается за счет применения балансных каскадов. Схемы подобного вида используются в том случае, когда применение трансформаторов по тем или иным причинам невозможно, например, на очень низких частотах и при переходе на методы микроэлектроники.

Как и в предыдущем случае, расчет может быть выполнен с учетом шумов всех каскадов или части из них, при пренебрежении шумами одного или двух последующих каскадов. Точно так же в качестве исходных данных служат сигнальные и шумовые параметры элементов, на основании которых определяются параметры ба-

Таблица 4.5

№ каскада	Параметры каскада					
	сигнальные			шумовые		
1	$-\frac{\Delta h^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{2h_{11}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$-\frac{(1+h_{11}^{(1)}Y^{(1)})h_{22}^{(1)}}{2h_{21}^{(1)}}$	$\frac{1+h_{11}^{(1)}Y^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{G_{шн}^{(1)}+G_{ш}^{(1)}}{2}$	$\frac{Y_{кор}^{(1)}+Y^{(1)}}{2}$
2	$-\frac{\Delta h^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{2h_{11}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$-\frac{(1+h_{11}^{(2)}Y^{(2)})h_{22}^{(2)}}{2h_{21}^{(2)}}$	$\frac{1+h_{11}^{(2)}Y^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{G_{шн}^{(2)}+G_{ш}^{(2)}}{2}$	$\frac{Y_{кор}^{(2)}+Y^{(2)}}{2}$
3	$-\frac{\Delta h^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{2h_{11}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$-\frac{(1+h_{11}^{(3)}Y^{(3)})h_{22}^{(3)}}{2h_{21}^{(3)}}$	$\frac{1+h_{11}^{(3)}Y^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{G_{шн}^{(3)}+G_{ш}^{(3)}}{2}$	$\frac{Y_{кор}^{(3)}+Y^{(3)}}{2}$

Примечание. Сигнальные и шумовые параметры усилительных каскадов для случая попарно идентичных транзисторов $T^{(1)} \sim T^{(2)}$, $T^{(3)} \sim T^{(4)}$, $T^{(5)} \sim T^{(6)}$ и проводимостей $Y^{(1)} = Y^{(2)}$, $Y^{(3)} = Y^{(4)}$, $Y^{(5)} = Y^{(6)}$.

лансных каскадов. Последние рассчитываются по формулам последовательного соединения шумящих четырехполюсников и в окончательном виде представлены в табл. 4.5.

4.3. УСИЛИТЕЛИ С ООС ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА

Структурная схема трехкаскадного усилителя с ООС последовательного типа представлена на рис. 4.4. На ней учтены шумы всех составляющих: трех каскадов уси-

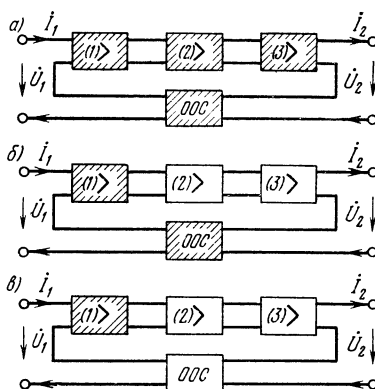


Рис. 4.4 Структурная схема усилителя с ООС последовательного типа, учитывающая шумы:
а) всех составляющих, б) первого каскада и цепи ООС, в) первого каскада

ления и цепи ООС (а), шумы первого каскада и цепи ООС (б), только первого каскада (в) (в последующих примерах характер обозначений сохраняется). Выбор той или иной шумовой модели соотнобразуется с изложенными уже выше мотивами.

Порядок расчета шумов усилителя с ООС последовательного типа (как и следующих далее) сводится к двум стадиям — расчету шумовых параметров трехкаскадного усилителя без ООС и шумовых параметров с учетом ООС. Последовательность расчета шумовых показателей усилителя без ООС установлена выше, поэтому воспользуемся ею и разовьем методику дальше.

1. Исходные данные дополняем параметрами цепи обратной связи (табл. 4.6).

Т а б л и ц а 4.6

Наименова- ние цепи	Параметры каскада							Примеча- ние
	сигнальные				шумовые ¹⁾			
Каскад 1	$a_{11}^{(1)}$	$a_{12}^{(1)}$	$a_{21}^{(1)}$	$a_{22}^{(1)}$	$R_{\text{шн}}^{(1)}$	$G_{\text{ша}}^{(1)}$	$Z_{\text{кор}}^{(1)}$	¹⁾ для схем а, б, в
Каскад 2	$a_{11}^{(2)}$	$a_{12}^{(2)}$	$a_{21}^{(2)}$	$a_{22}^{(2)}$	$R_{\text{шн}}^{(2)}$	$G_{\text{ша}}^{(2)}$	$Z_{\text{кор}}^{(2)}$	для схем а, б
Каскад 3	$a_{11}^{(3)}$	$a_{12}^{(3)}$	$a_{21}^{(3)}$	$a_{22}^{(3)}$	$R_{\text{шн}}^{(3)}$	$G_{\text{ша}}^{(3)}$	$Z_{\text{кор}}^{(3)}$	для схемы а
Цепь ООС	$z_{11}^{(\text{п})}$	$z_{12}^{(\text{п})}$	$z_{21}^{(\text{п})}$	$z_{22}^{(\text{п})}$	$R_{\text{шн}}^{(\text{п})}$	$G_{\text{ша}}^{(\text{п})}$	$Z_{\text{кор}}^{(\text{п})}$	для схем а, б

¹⁾ Для расчета сигнальных и шумовых показателей усилителя с ООС последовательного типа используется система z -параметров.

2. Новым звеном в расчете является переход от системы a к параметрам z_{11}^{yc} , z_{12}^{yc} , z_{21}^{yc} и z_{22}^{yc} , используемым при последовательном соединении четырехполюсников [15, 35].

3. На основе полученных параметров трехкаскадного усилителя и цепи ООС найдем результирующие параметры усилителя с общей ООС:

$$G_{\text{ш } a}^{(p)} = \frac{G_{\text{ш } a}^{(\text{yc})} |z_{21}^{(\text{yc})}|^2 + G_{\text{ш } a}^{(\text{oc})} |z_{21}^{(\text{oc})}|^2}{|z_{21}^{(\text{yc})} + z_{21}^{(\text{oc})}|^2}, \quad (4.13)$$

$$R_{\text{шн}}^{(p)} = R_{\text{шн}}^{(\text{yc})} + R_{\text{шн}}^{(\text{oc})} + \frac{G_{\text{ш } a}^{(\text{yc})} G_{\text{ш } a}^{(\text{oc})} |(Z_{\text{кор}}^{(\text{yc})} - z_{11}^{(\text{yc})}) z_{21}^{(\text{oc})} - \rightarrow \\ \rightarrow - (Z_{\text{кор}}^{(\text{oc})} - z_{11}^{(\text{oc})}) z_{21}^{(\text{yc})}|^2}{G_{\text{ш } a}^{(\text{yc})} |z_{21}^{(\text{yc})}|^2 + G_{\text{ш } a}^{(\text{oc})} |z_{21}^{(\text{oc})}|^2}, \quad (4.14)$$

$$Z_{\text{кор}}^{(p)} = Z_{\text{кор}}^{(\text{yc})} + Z_{\text{кор}}^{(\text{oc})} + \frac{(G_{\text{ш } a}^{(\text{yc})} z_{21}^{(\text{yc})*} - G_{\text{ш } a}^{(\text{oc})} z_{21}^{(\text{oc})*}) \times \rightarrow \\ \rightarrow \times [(Z_{\text{кор}}^{(\text{yc})} - z_{11}^{(\text{yc})}) z_{21}^{(\text{oc})} - (Z_{\text{кор}}^{(\text{oc})} - z_{11}^{(\text{oc})}) z_{21}^{(\text{yc})}]}{G_{\text{ш } a}^{(\text{yc})} |z_{21}^{(\text{yc})}|^2 + G_{\text{ш } a}^{(\text{oc})} |z_{21}^{(\text{oc})}|^2}. \quad (4.15)$$

92 Таблица 4.7

Наименование цепи	Параметры каскада					
	сигнальные			шумовые		
Каскад 1	$-\frac{\Delta h^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{h_{11}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(1)} Y^{(1)}) h_{22}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(1)} Y^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$G_{\text{шн}}^{(1)} + G_{\text{ш}}^{(1)}$	$R_{\text{ша}}^{(1)} Y_{\text{кор}}^{(1)} + Y^{(1)}$
Каскад 2	$-\frac{\Delta h^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{h_{11}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(2)} Y^{(2)}) h_{22}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(2)} Y^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$G_{\text{шн}}^{(2)} + G_{\text{ш}}^{(2)}$	$R_{\text{ша}}^{(2)} Y_{\text{кор}}^{(2)} + Y^{(2)}$
Каскад 3	$-\frac{\Delta h^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{h_{11}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(3)} Y^{(3)}) h_{22}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(3)} Y^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$G_{\text{шн}}^{(3)} + G_{\text{ш}}^{(3)}$	$R_{\text{ша}}^{(3)} Y_{\text{кор}}^{(3)} + Y^{(3)}$
Цепь ООС	Z	$-Z$	Z	$-Z$	$-$	$-\frac{R_{\text{ш}}}{ Z ^2}$

Примечание. Шумовые параметры используются согласно порядковым номерам каскадов для схем: а) 1, 2, 3, 4; б) 1, 4, в) 1.

4. После этого определим коэффициент шума всего усилителя, а при необходимости — его оптимальную и минимальную величины.

Упрощенная схема транзисторного усилителя представлена на рис. 4.5. Последовательная ООС в нем осу-

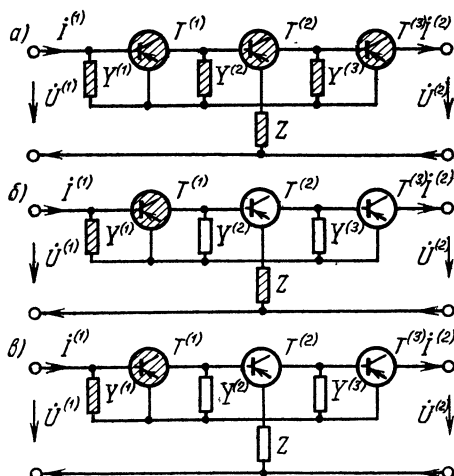


Рис. 4.5. Упрощенная схема транзисторного усилителя с ООС последовательного типа, учитывающая шумы:

а) всех составляющих, б) первого каскада и цепи ООС, в) первого каскада

ществляется за счет сопротивления Z . Порядок расчета усилителя аналогичен модели обобщенного вида, но в качестве параметров используются данные из табл. 4.7.

4.4. УСИЛИТЕЛИ С ООС ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТИПА

Структурная схема трехкаскадного усилителя с ООС параллельного типа приведена на рис. 4.6. Шумы его составляющих учтены по тому же принципу, что и в предшествующем примере. Поэтому обратим внимание лишь на отличия и особенности расчета (как и всюду далее).

1. Исходные данные для расчета усилителя дополняем сигнальными и шумовыми параметрами цепи ООС, приведенными в табл. 4.8.

2. Параллельное соединение рассчитывается в системе y -параметров, поэтому сигнальные величины собст-

венно усилителя пересчитываем в параметры: $y_{11}^{(yc)}$, $y_{12}^{(yc)}$, $y_{21}^{(yc)}$, $y_{22}^{(yc)}$.

3. Располагая необходимыми исходными данными, определим результирующие шумовые параметры:

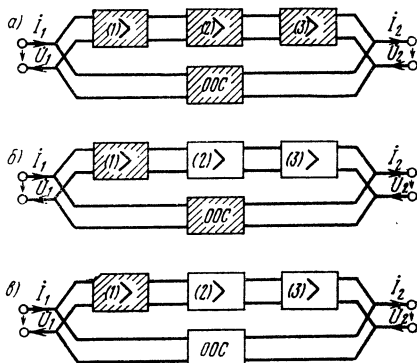


Рис. 4.6. Структурная схема усилителя с ООС параллельного типа, учитывающая шумы.

а) всех составляющих, б) первого каскада и цепи ООС, в) первого каскада

$$R_{ш а}^{(p)} = \frac{R_{ш а}^{(yc)} |y_{21}^{(yc)}|^2 + R_{ш а}^{(oc)} |y_{21}^{(oc)}|^2}{|y_{21}^{(yc)} + y_{21}^{(oc)}|^2}, \quad (4.16)$$

$$G_{шн}^{(p)} = G_{шн}^{(yc)} + G_{шн}^{(oc)} + \frac{R_{ш а}^{(yc)} R_{ш а}^{(oc)} |(Y_{кор}^{(yc)} - y_{11}^{(yc)}) y_{21}^{(oc)} - \rightarrow}{R_{ш а}^{(yc)} |y_{21}^{(yc)}|^2 + R_{ш а}^{(oc)} |y_{21}^{(oc)}|^2} \rightarrow - (Y_{кор}^{(oc)} - y_{11}^{(oc)}) y_{21}^{(yc)}|^2, \quad (4.17)$$

$$Y_{кор}^{(p)} = Y_{кор}^{(yc)} + Y_{кор}^{(oc)} + \frac{(R_{ш а}^{(yc)} y_{21}^{(yc)*} - R_{ш а}^{(oc)} y_{21}^{(oc)*}) \times \rightarrow}{R_{ш а}^{(yc)} |y_{21}^{(yc)}|^2 + R_{ш а}^{(oc)} |y_{21}^{(oc)}|^2} \rightarrow \times [(Y_{кор}^{(yc)} - y_{11}^{(yc)}) y_{21}^{(oc)} - (Y_{кор}^{(oc)} - y_{11}^{(oc)}) y_{21}^{(yc)}] \quad (4.18)$$

4. Дальнейший расчет шумовых величин производится по обобщенным выражениям [35].

Таблица 4.8

Наименование цепи	Параметры каскада							Примечание
	сигнальные				шумовые ¹⁾			
Каскад 1	$a_{11}^{(1)}$	$a_{12}^{(1)}$	$a_{21}^{(1)}$	$a_{22}^{(1)}$	$G_{шн}^{(1)}$	$R_{ша}^{(1)}$	$Y_{кор}^{(1)}$	¹⁾ для схем а, б, в
Каскад 2	$a_{11}^{(2)}$	$a_{12}^{(2)}$	$a_{21}^{(2)}$	$a_{22}^{(2)}$	$G_{шн}^{(2)}$	$R_{ша}^{(2)}$	$Y_{кор}^{(2)}$	для схем а, б
Каскад 3	$a_{11}^{(3)}$	$a_{12}^{(3)}$	$a_{21}^{(3)}$	$a_{22}^{(3)}$	$G_{шн}^{(3)}$	$R_{ша}^{(3)}$	$Y_{кор}^{(3)}$	для схемы а
Цепь ООС	$y_{11}^{(п)}$	$y_{12}^{(п)}$	$y_{21}^{(п)}$	$y_{22}^{(п)}$	$G_{шн}^{(п)}$	$R_{ша}^{(п)}$	$Y_{кор}^{(п)}$	для схем а, б

¹⁾ Для расчета сигнальных и шумовых показателей усилителя с ООС параллельного типа используется система y -параметров.

Упрощенная схема трехкаскадного транзисторного усилителя представлена на рис. 4.7. Параллельная ООС

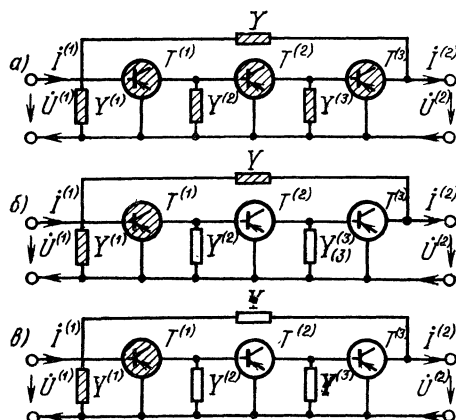


Рис. 4.7. Упрощенная схема транзисторного усилителя с ООС параллельного типа, учитывающая шумы:

а) всех составляющих, б) первого каскада и цепи ООС, в) первого каскада

осуществляется за счет проводимости Y . Порядок расчета его сохраняется, как и в общем случае, но в качестве параметров используются данные табл. 4.9.

96
Таблица 4.9

Наименование цепи	Параметры каскада					
	сигнальные			шумовые		
Каскад 1	$-\frac{\Delta h^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{h_{11}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(1)} Y^{(1)}) h_{22}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(1)} Y^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$G_{шн}^{(1)} + G_{ш}^{(1)}$	$R_{ша}^{(1)} Y_{кор}^{(1)} + Y^{(1)}$
Каскад 2	$-\frac{\Delta h^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{h_{11}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(2)} Y^{(2)}) h_{22}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(2)} Y^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$G_{ша}^{(2)} + G_{ш}^{(2)}$	$R_{ша}^{(2)} Y_{кор}^{(2)} + Y^{(2)}$
Каскад 3	$-\frac{\Delta h^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{h_{11}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(3)} Y^{(3)}) h_{22}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(3)} Y^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$G_{ша}^{(3)} + G_{ш}^{(3)}$	$R_{ша}^{(3)} Y_{кор}^{(3)} + Y^{(3)}$
Цепь(4)ООС	Y	$-Y$	Y	$-Y$	$-$	$\frac{G_{ш}}{ Y ^2}$

Примечание. Шумовые параметры используются согласно порядковым номерам каскадов для схем: а) 1, 2, 3, 4; б) 1, 4; в) 1.

4.5. УСИЛИТЕЛИ С ООС ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ТИПА

Структурная схема трехкаскадного усилителя с ООС последовательно-параллельного типа представлена на рис. 4.8.

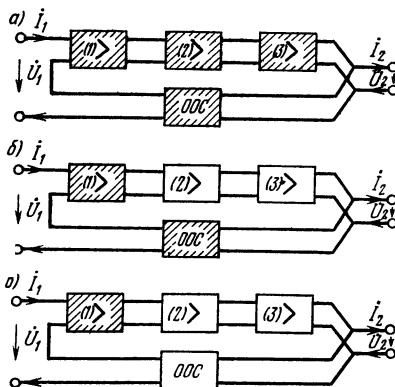


Рис. 4.8. Структурная схема усилителя с ООС последовательно-параллельного типа, учитывающая шумы:

а) всех составляющих, б) первого каскада и цепи ООС. в) первого каскада

1. Исходные данные для расчета усилителя сведены в табл. 4.10. Сигнальные и шумовые параметры каскадов усилителя в ней дополнены аналогичными показателями цепи ООС.

2. Последовательно-параллельное соединение рассчитывается в системе h -параметров, поэтому результирующие сигнальные величины переводятся в систему h -параметров:

$$h_{11}^{(yc)}, h_{12}^{(yc)}, h_{21}^{(yc)}, h_{22}^{(yc)}.$$

3. Используя параметры трехкаскадного усилителя и цепи ООС, находим результирующие параметры всего соединения:

$$G_{шa}^{(p)} = \frac{G_{шa}^{(yc)} |h_{21}^{(yc)}|^2 + G_{шa}^{(oc)} |h_{21}^{(oc)}|^2}{|h_{21}^{(yc)} + h_{21}^{(oc)}|^2}, \quad (4.19)$$

$$R_{шн}^{(p)} = R_{шн}^{(yc)} + R_{шн}^{(oc)} + \frac{G_{шa}^{(yc)} G_{шa}^{(oc)} (Z_{кор}^{(yc)} - h_{11}^{(yc)}) h_{21}^{(oc)} \rightarrow}{G_{шa}^{(yc)} |h_{21}^{(yc)}|^2 + G_{шa}^{(oc)} |h_{21}^{(oc)}|^2} \rightarrow - (Z_{кор}^{(oc)} - h_{11}^{(oc)}) h_{21}^{(yc)}|^2 \quad (4.20)$$

Т а б л и ц а 4.10

Наименование цепи	Параметры каскада							Примечание
	сигнальные				шумовые			
Каскад 1	$a_{11}^{(1)}$	$a_{12}^{(1)}$	$a_{21}^{(1)}$	$a_{22}^{(1)}$	$R_{шн}^{(1)}$	$G_{ша}^{(1)}$	$Z_{кор}^{(1)}$	1) для схем а, б, в
Каскад 2	$a_{11}^{(2)}$	$a_{12}^{(2)}$	$a_{21}^{(2)}$	$a_{22}^{(2)}$	$R_{шн}^{(2)}$	$G_{ша}^{(2)}$	$Z_{кор}^{(2)}$	для схем а, б
Каскад 3	$a_{11}^{(3)}$	$a_{12}^{(3)}$	$a_{21}^{(3)}$	$a_{22}^{(3)}$	$R_{ша}^{(3)}$	$G_{ша}^{(3)}$	$Z_{кор}^{(3)}$	для схемы а
Цепь ООС	$h_{11}^{(п)}$	$h_{12}^{(п)}$	$h_{21}^{(п)}$	$h_{22}^{(п)}$	$R_{ша}^{(п)}$	$G_{ша}^{(п)}$	$Z_{кор}^{(п)}$	для схем а, б

1) Для расчета сигнальных и шумовых показателей усилителя с ООС последовательно-параллельного типа используется система h -параметров.

$$Z_{кор}^{(п)} = Z_{кор}^{(yc)} + Z_{кор}^{(oc)} + \frac{(G_{ша}^{(yc)} h_{21}^{(yc)*} - G_{ша}^{(oc)} h_{21}^{(oc)*}) \times \rightarrow}{G_{ша}^{(yc)} |h_{21}^{(yc)}|^2 + G_{ша}^{(oc)} |h_{21}^{(oc)}|^2} \rightarrow \times [(Z_{кор}^{(yc)} - h_{11}^{(yc)}) h_{21}^{(oc)} - (Z_{кор}^{(oc)} - h_{11}^{(oc)}) h_{21}^{(yc)}] \quad (4.21)$$

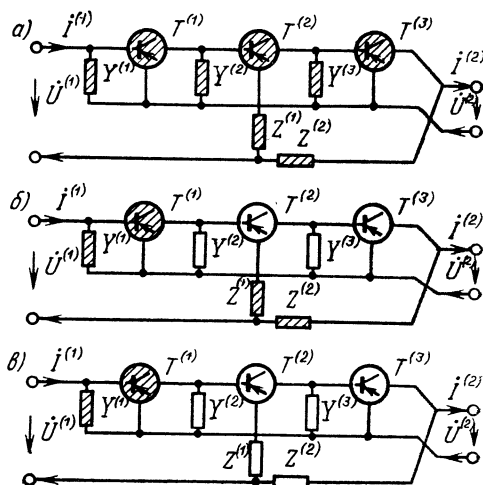


Рис. 4.9. Упрощенная схема транзисторного усилителя с ООС последовательно-параллельного типа, учитывающая шумы: а) всех составляющих, б) первого каскада и цепи ООС, в) первого каскада

4. По результирующим параметрам всего соединения рассчитываются требуемые шумовые показатели, сигнальные величины. Один из упрощенных вариантов трехкаскадного усилителя на транзисторах с ООС последовательно-параллельного типа представлен на рис. 4.9. Цепь ООС в усилителе образуется сопротивлениями Z_1 и Z_2 . Шумовые параметры усилителя рассчитываются по (4.1) — (4.3) и данным табл. 4.11. При необходимости могут быть рассчитаны шумовые токи и напряжения в различных точках схемы усилителя [35].

4.6. УСИЛИТЕЛИ С ООС ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА

Структурная схема трехкаскадного усилителя с ООС параллельно-последовательного типа представлена на рис. 4.10.

1. Отправные данные для расчета усилителя сведены в табл. 4.12, которая дополнена показателями цепи общей ООС.

2. Параллельно-последовательное соединение рассчитывается в системе f , к которой приводятся параметры собственно усилителя и определяются $f_{11}^{(yc)}$, $f_{12}^{(yc)}$, $f_{21}^{(yc)}$, $f_{22}^{(yc)}$.

3. Используя параметры трехкаскадного усилителя и цепи ООС, находим результирующие параметры всего соединения:

$$R_{ш а}^{(p)} = \frac{R_{ш а}^{(yc)} |f_{21}^{(yc)}|^2 + R_{ш а}^{(oc)} |f_{21}^{(oc)}|^2}{|f_{21}^{(yc)} + f_{21}^{(oc)*}|^2}, \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} G_{шн}^{(p)} &= G_{шн}^{(yc)} + G_{шн}^{(oc)} + \frac{R_{ш а}^{(yc)} R_{ш а}^{(oc)} | (Y_{кор}^{(yc)} - f_{11}^{(yc)}) f_{21}^{(oc)} - \\ &\rightarrow - (Y_{кор}^{(oc)} - f_{11}^{(oc)}) f_{21}^{(yc)} |^2}{R_{ш а}^{(yc)} |f_{21}^{(yc)}|^2 + R_{ш а}^{(oc)} |f_{21}^{(oc)}|^2} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} Y_{кор}^{(p)} &= Y_{кор}^{(yc)} + Y_{кор}^{(oc)} + \frac{(R_{ш а}^{(yc)} f_{21}^{(yc)*} - R_{ш а}^{(oc)} f_{21}^{(oc)*}) \times \rightarrow \\ &\rightarrow \times [(Y_{кор}^{(yc)} - f_{11}^{(yc)}) f_{21}^{(oc)} - (Y_{кор}^{(oc)} - f_{11}^{(oc)}) f_{21}^{(yc)}]}{R_{ш а}^{(yc)} |f_{21}^{(yc)}|^2 + R_{ш а}^{(oc)} |f_{21}^{(oc)}|^2}. \end{aligned} \quad (4.24)$$

4. По результирующим параметрам усилителя при необходимости рассчитываются коэффициент шума и его экстремальные значения.

Таблица 4.11

Наименование цепи	Параметры каскада				
	сигнальные			шумовые	
Каскад 1	$-\frac{\Delta h^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{h_{11}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(1)} Y^{(1)}) h_{22}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(1)} Y^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$G_{\text{шн}}^{(1)} + G_{\text{ш}}^{(1)}$ $R_{\text{шн}}^{(1)}$ $Y_{\text{кор}}^{(1)} + Y^{(1)}$
Каскад 2	$-\frac{\Delta h^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{h_{11}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(2)} Y^{(2)}) h_{22}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(2)} Y^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$G_{\text{шн}}^{(2)} + G_{\text{ш}}^{(2)}$ $R_{\text{шн}}^{(2)}$ $Y_{\text{кор}}^{(2)} + Y^{(2)}$
Каскад 3	$-\frac{\Delta h^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{h_{11}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(3)} Y^{(3)}) h_{22}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(3)} Y^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$G_{\text{шн}}^{(3)} + G_{\text{ш}}^{(3)}$ $R_{\text{шн}}^{(3)}$ $Y_{\text{кор}}^{(3)} + Y^{(3)}$
Цепь(4)ООС	$Y_1 + Y_2$	$-Y_2$	Y_2	$-Y_2$	$\frac{R_{\text{ш1}} R_{\text{ш2}}}{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}}$ $\frac{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}}{ Z_1 ^2}$ $\frac{Z_1 R_{\text{ш2}}}{R_{\text{ш1}} + R_{\text{ш2}}}$

Примечание. Шумовые параметры используются согласно порядковым номерам каскадов для схем: а) 1, 2, 3, 4; б) 1, 4, а) 1.

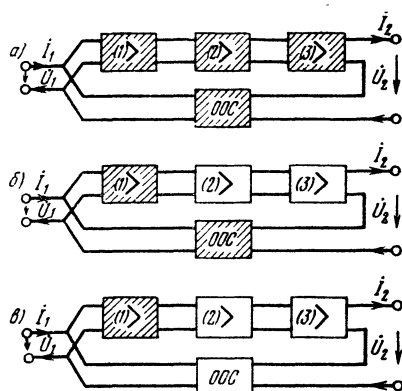


Рис. 4.10. Структурная схема усилителя с ООС параллельно-последовательного типа, учитывающая шумы: а) всех составляющих, б) первого каскада и цепи ООС, в) первого каскада

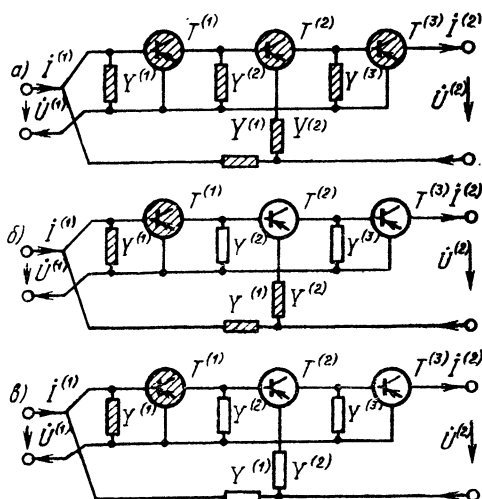


Рис. 4.11. Упрощенная схема транзисторного усилителя с ООС параллельно-последовательного типа, учитывающая шумы: а) всех составляющих, б) первого каскада и цепи ООС, в) первого каскада

Т а б л и ц а 4.12

Наименование цепи	Параметры каскада							Примечание
	сигнальные				шумовые ¹⁾			
Каскад 1	$a_{11}^{(1)}$	$a_{12}^{(1)}$	$a_{21}^{(1)}$	$a_{22}^{(1)}$	$G_{\text{шн}}^{(1)}$	$R_{\text{ша}}^{(1)}$	$Y_{\text{кор}}^{(1)}$	¹⁾ для схем а, б, в
Каскад 2	$a_{11}^{(2)}$	$a_{12}^{(2)}$	$a_{21}^{(2)}$	$a_{22}^{(2)}$	$G_{\text{шн}}^{(2)}$	$R_{\text{ша}}^{(2)}$	$Y_{\text{кор}}^{(2)}$	для схем а, б
Каскад 3	$a_{11}^{(3)}$	$a_{12}^{(3)}$	$a_{21}^{(3)}$	$a_{22}^{(3)}$	$G_{\text{шн}}^{(3)}$	$R_{\text{ша}}^{(3)}$	$Y_{\text{кор}}^{(3)}$	для схемы а
Цепь ООС	$f_{11}^{(\text{п})}$	$f_{12}^{(\text{п})}$	$f_{21}^{(\text{п})}$	$f_{22}^{(\text{п})}$	$G_{\text{шн}}^{(\text{п})}$	$R_{\text{ша}}^{(\text{п})}$	$Y_{\text{кор}}^{(\text{п})}$	для схем а, б

¹⁾ Для расчета сигнальных и шумовых показателей усилителя с ООС параллельно-последовательного типа используется система f -параметров.

Упрощенная схема трехкаскадного усилителя на транзисторах с ООС параллельно-последовательного типа представлена на рис. 4.11. Обратная связь в ней осуществляется с помощью проводимостей Y_1 и Y_2 . Расчет шумовых величин производится по (4.22) — (4.24) с использованием данных табл. 4.13. В случае необходимости шумовые токи и напряжения любого каскада усилителя рассчитываются по известным формулам [35].

Таблица 4.13

Наименование цепи	Параметры каскада					
	сигнальные			шумовые		
Каскад 1	$-\frac{\Delta h^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{h_{11}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(1)} Y^{(1)}) h_{22}^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(1)} Y^{(1)}}{h_{21}^{(1)}}$	$G_{шн}^{(1)} + G_{ш}^{(1)}$	$R_{шз}^{(1)} Y_{кор}^{(1)} + Y^{(1)}$
Каскад 2	$-\frac{\Delta h^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{h_{11}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(2)} Y^{(2)}) h_{22}^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(2)} Y^{(2)}}{h_{21}^{(2)}}$	$G_{шн}^{(2)} + G_{ш}^{(2)}$	$Y_{кор}^{(2)} + Y^{(2)}$
Каскад 3	$-\frac{\Delta h^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{h_{11}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$-\frac{(1 + h_{11}^{(3)} Y^{(3)}) h_{22}^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$\frac{1 + h_{11}^{(3)} Y^{(3)}}{h_{21}^{(3)}}$	$G_{шн}^{(3)} + G_{ш}^{(3)}$	$Y_{кор}^{(3)} + Y^{(3)}$
Цепь (4) ООС	Y_1	$-Y_1$	Y_1	$-(Y_1 \nleftrightarrow Y_2)$	$\frac{G_{шн} G_{шз}}{G_{шн} \nleftrightarrow G_{шз}}$	$\frac{Y_1 G_{шз}}{G_{шн} \nleftrightarrow G_{шз}}$

Примечание. Шумовые параметры используются согласно порядковым номерам каскадов для схем: а) 1, 2, 3, 4; б) 1, 4; в) 1.

ПРОГРАММНЫЙ РАСЧЕТ ШУМЯЩИХ ЦЕПЕЙ

5.1. НАПРАВЛЕНИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Расчет по программам на ЭВМ (назовем программным расчетом) находит все более широкое применение в решении практических задач, опирающихся на теорию электрических цепей. Интенсивное развитие программного расчета связано не только с его эффективностью — сокращением времени, высокой точностью, широтой обзора и т. д., но и с появлением новых задач, диктуемых переходом на методы интегральной микроэлектроники. Ввиду сложности решение их возможно лишь на базе математического моделирования и использования ЭВМ [1, 24, 33, 42].

Развитие программного расчета в укрупненном плане можно представить двумя традиционными направлениями, базирующимися на широко известных методах: 1) узловых напряжений и контурных токов (или их модификациях); 2) четырехполюсника, как частного случая многополюсника.

В первом случае для установления взаимосвязей преимущественно используются физические схемы замещения электрической цепи и ее элементов, поиск оптимального варианта которой в последнее время возлагается на ЭВМ; во втором — за основу принимается каноническая схема замещения и уравнения четырехполюсника (или многополюсника). Иногда эти методы противопоставляются или необоснованно распространяются на решения задач, им не свойственных, что приводит к излишним усложнениям и неверным выводам об их возможностях и достоинствах.

Недостатки методов, базирующихся на определении узловых напряжений и контурных токов, обусловлены: невозможностью применения их к цепям с распределенными параметрами; необходимостью поиска физической схемы замещения цепи (модели), элементы которой не всегда легко определить экспериментально; сложностью достижения хорошей аппроксимации экспериментальных

характеристик в широкой полосе частот, приводящей к необходимости использования нескольких вариантов схем замещения; потребностью в ЭВМ с большой памятью при расчете сложных цепей; чрезвычайной сложностью определения физических схем замещения интегральных структур и особенно с аналогами пассивных элементов. В связи с последним отметим, что отыскание схем замещения микроструктур по мере повышения степени их интеграции (с переходом на БИС) усложняется и становится все более затруднительным, а в последующем вообще может оказаться невозможным.

Метод четырехполюсника (многополюсника), в отличие от рассмотренного, позволяет независимо от структуры описать цепь с помощью матрицы частотных характеристик в комплексной плоскости (при постоянстве их во времени). Во многих случаях можно экспериментально получить матрицу частотных характеристик, ничего не зная о внутренней структуре цепи.

Метод четырехполюсника применим к структурам с сосредоточенными и распределенными параметрами; приводит к легко выполнимым расчетам сложных цепей при разделении их на ряд простых схем; позволяет использовать как аналитические, так и экспериментальные данные; сокращает время и объем работ за счет многократного применения типовых схем. Достоинства метода особенно наглядно проявляются при расчете интегральных цепей, выполняемых, например, в объеме одного полупроводникового кристалла (монокристаллической структуры). Внешние выводы такого устройства являются единственно доступными для измерения точками (для снятия характеристик, соединения и т. д.), поэтому определение физической схемы замещения готового элемента со всеми паразитными связями становится практически невозможным.

Сопоставляя программные методы расчета, следует отметить и ряд существенных достоинств первого: нерегулярность электрической цепи не накладывает на него каких-либо ограничений; физические схемы замещения обладают полезной во многих отношениях наглядностью, полнее раскрывают возможности элементов и способствуют выявлению путей их совершенствования.

Из вышеизложенного видим, что ни один из методов не может рассматриваться в отдельности как всеобъемлющий и универсальный. Каждому из них присущи свои достоинства и недостатки, поэтому представляется наи-

более рациональным разумное их сочетание. Это позволит избавиться от ограниченности, свойственной каждому из них, и расширит возможности программного расчета электрических цепей.

Прежде чем перейти к составлению программ, наметим поэтапный порядок расчета шумовых показателей электрической цепи:

- выяснение природы флуктуаций и взаимосвязи с физическими параметрами элемента;

- отыскание физической шумовой схемы замещения и взаимосвязи ее составляющих;

- определение шумовых параметров канонической схемы замещения четырехполюсника;

- расчет показателей шума нагруженной электрической цепи (согласно условиям задачи);

- определение оптимальных шумовых показателей и условий их достижения (как проверка на «оптимальность» или конечная цель).

При составлении программы намеченный порядок расчета является отправным для поиска наиболее гибкой ее структуры

5.2. ПРОГРАММА РАСЧЕТА ШУМОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА (СИСТЕМЫ)

В основу программирования положен блочный принцип, согласно которому для расчета шумовых величин четырехполюсника получена структурная схема (рис. 5.1). Образующие программу блоки по входным и выходным показателям представляют вполне самостоятельные звенья. Это позволяет решать задачи на том уровне, который вытекает из условий расчета, включая получение расчетных данных на уровне промежуточных звеньев.

БЛОК Ф-1. Программа этого блока рассчитана на определение шумовых токов и напряжений, исходя из схемы замещения шумящей цепи, построенной на базе физических представлений о протекающих в ней процессах. Она основывается на топологических методах анализа электрических цепей и эквивалентных источниках шумов $\dot{e}_{шi}$ и $\dot{i}_{шi}$ ($i = 1, 2, 3 \dots$), каждый из которых представляет «свои» флуктуации.

БЛОК Ф-2. Программа второго блока является переходной, связывающей шумовые токи и напряжения физической и канонической схем замещения четырехполюс-

ника. В последней по возможности учитывается физическая основа происходящих в четырехполюснике флуктуационных процессов. Шумовая каноническая схема замещения обычно получается из соответствующей сигнальной схемы, дополненной источниками шума. Чаще всего они предполагаются некоррелированными и представляют результирующие источники шума $\dot{e}_{шк}$ и $i_{шк}$.

БЛОК Ф-3. Первичные шумовые параметры рассчитываются по данным шумовой канонической схемы замещения четырехполюсника. Программа третьего блока обеспечивает расчет величин $\Phi_{шн}$, $\Phi_{ша}$ и $\Phi_{кор}$, которые в обобщенном виде представляют системы первичных шумовых параметров: $R_{шн}$, $G_{ша}$, $Z_{кор}$ и $G_{шн}$, $R_{ша}$, $Y_{кор}$. Эти параметры пока не приводятся в паспортных данных на элементы электрических цепей или же задаются в неявном виде через источники шума без учета корреляционных связей между ними. Поэтому первичные шумовые параметры могут быть рассчитаны или же, чаще всего, непосредственно измеряются одним из известных способов.

БЛОК Ф-4. Программа блока предназначается для определения коэффициентов шума четырехполюсника и системы передачи (учитываются флуктуации нагрузки). Основой для расчета служат выходные или вводимые извне первичные шумовые параметры четырехполюсника, данные предыдущего блока и условия задачи.

БЛОК Ф-5. Основная задача, решаемая этим блоком, состоит в определении оптимизации и условий минимизации коэффициента шума.

БЛОК Ф-6. Посредством программы данного блока рассчитываются оптимальный и минимальный коэффициенты шума (или четырехполюсника системы передачи).

Программа „Шум-711“

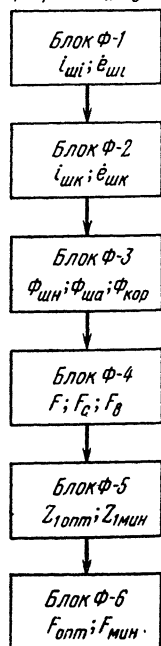


Рис. 5.1. Структурная схема программы расчета шумов четырехполюсника (системы)

5.3. ПРОГРАММА РАСЧЕТА ШУМОВ СЛОЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

На рис. 5.2 представлена структурная схема программы, предназначенной для расчета показателей шума сложных электрических цепей, назначение блоков ко-

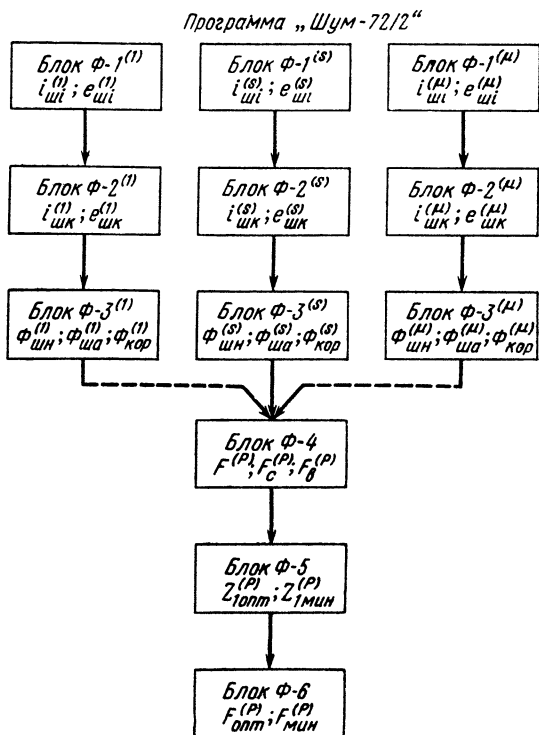


Рис. 5.2. Структурная схема программы расчета шумов сложных соединений четырехполюсников

торой пояснено на примере одиночного четырехполюсника. Предполагается, что составляющие цепь шумящие четырехполюсники образуют регулярные соединения. Число их может быть любым и в общем случае составлять μ единиц, при $\mu=1$ она обращается в программу (рис. 5.1), поэтому последняя отдельно не приводится, а служит своего рода иллюстрацией сформулированным выше принципам — каждый блок содержит часть общей программы, которая может использоваться самостоя-

тельно. Возможно использование совокупности блоков общей программы в виде укрупненной ее части.

Расчет по программе может производиться как с учетом флуктуаций нагрузки, так и при пренебрежении ими. Ввиду одинаковой математической структуры формул для расчета результирующих параметров всех видов соединений четырехполюсников введем единые обозначения параметров: сигнальные c ; шумовые Φ . Используя сведенные в табл. 5.1 обозначения, составим единую для последовательного, параллельного, последовательно-параллельного, параллельно-последовательного соединений программу.

Величина N в программе определяет количество четырехполюсников, T — отвлеченная константа. При $T=1$ производится дополнительное деление комплексных чисел, например, в случае соединения транзисторов. При $T \neq 1$ счет программы идет без процедуры деления. На печать выводятся величины N , T , Re , c_{11} , $\text{Im}c_{11}$, $\text{Re}c_{21}$, $\text{Im}c_{21}$, $\text{Re}\Phi_K$, $\text{Im}\Phi_K$, $\Phi_{шa}$, $\Phi_{шн}$, $\text{Re}\Phi_{Ks}$, $\text{Im}\Phi_{Ks}$, $\Phi_{шa}$, $\Phi_{шн}$.

Выражение истинных параметров, в случае соединения конкретных четырехполюсников через формальные, определяется по приведенной таблице. Так, например, для последовательного соединения $\text{Re}\Phi_{\text{кор}} = \text{Re}Z_{\text{кор}}^{(p)}$, $\text{Im}\Phi_{\text{кн}} = \text{Im}Z_{\text{кор}}^{(p)}$, $\Phi_{шa} = G_{шa}^{(p)}$, $\Phi_{шн} = R_{шн}^{(p)}$ и т. д.

Программа написана на языке АЛГОЛ-60.

Таблица 5.1

Тип цепи	Обозначения сигнальных и шумовых параметров							
	Re c_{11s}	Im c_{11s}	Re c_{21s}	Im c_{21s}	Re p	Im p	Re g	Im g
$U-U$	Re $z_{11}^{(s)}$	Im $z_{11}^{(s)}$	Re $z_{21}^{(s)}$	Im $z_{21}^{(s)}$	—	—	—	—
$I-I$	Re $y_{11}^{(s)}$	Im $y_{11}^{(s)}$	Re $y_{21}^{(s)}$	Im $y_{21}^{(s)}$	—	—	—	—
$U-I$	Re $h_{11}^{(s)}$	Im $h_{11}^{(s)}$	Re $h_{21}^{(s)}$	Im $h_{21}^{(s)}$	—	—	—	—
$I-U$	Re $f_{11}^{(s)}$	Im $f_{11}^{(s)}$	Re $f_{21}^{(s)}$	Im $f_{21}^{(s)}$	—	—	—	—
$U-U^{(1)}$	$\operatorname{Re} \left(\frac{\Delta h}{h_{22}} \right)^{(s)}$	$\operatorname{Im} \left(\frac{\Delta h}{h_{22}} \right)^{(s)}$	$\operatorname{Re} \left(-\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)}$	$\operatorname{Im} \left(-\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)}$	— Re h_{21}	— Im h_{21}	Re h_{22}	Im h_{22}
$I-I^{(1)}$	$\operatorname{Re} \left(\frac{1}{h_{11}} \right)^{(s)}$	$\operatorname{Im} \left(\frac{1}{h_{11}} \right)^{(s)}$	$\operatorname{Re} \left(\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)}$	$\operatorname{Im} \left(\frac{h_{21}}{h_{22}} \right)^{(s)}$	Re h_{21}	Im h_{21}	Re h_{11}	Im h_{11}
$U-I^{(1)}$	Re $h_{11}^{(s)}$	Im $h_{11}^{(s)}$	Re $h_{21}^{(s)}$	Im $h_{21}^{(s)}$	—	—	—	—
$I-U^{(1)}$	$\operatorname{Re} \left(\frac{h_{22}}{\Delta h} \right)^{(s)}$	$\operatorname{Im} \left(\frac{h_{22}}{\Delta h} \right)^{(s)}$	$\operatorname{Re} \left(-\frac{h_{21}}{\Delta h} \right)^{(s)}$	$\operatorname{Im} \left(-\frac{h_{21}}{\Delta h} \right)^{(s)}$	— Re h_{21}	— Im h_{21}	Re Δh	Im Δh

¹⁾ Для транзисторных цепей в h -параметрах.

Продолжение табл. 5.1

Обозначения сигнальных и шумовых параметров									
Тип цепи	$\text{Im } U$	$\Phi_{\text{шaс}}$	$\Phi_{\text{шн}^{(s)}}$	$\text{Re } \Phi_{\text{к}^{(s)}}$	$\text{Im } \Phi_{\text{к}^{(s)}}$	$\Phi_{\text{шa}}$	$\Phi_{\text{шн}}$	$\text{Re } \Phi_{\text{к}}$	$\text{Im } \Phi_{\text{к}}$
$U - U$	—	$G_{\text{шa}}^{(s)}$	$R_{\text{шн}}^{(s)}$	$\text{Re } Z_{\text{кор}}^{(s)}$	$\text{Im } Z_{\text{кор}}^{(s)}$	$G_{\text{шa}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$\text{Re } Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$\text{Im } Z_{\text{кор}}^{(p)}$
$I - I$	—	$R_{\text{шa}}^{(s)}$	$G_{\text{шн}}^{(s)}$	$\text{Re } Y_{\text{кор}}^{(s)}$	$\text{Im } Y_{\text{кор}}^{(s)}$	$R_{\text{шa}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$\text{Re } Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$\text{Im } Y_{\text{кор}}^{(p)}$
$U - I$	—	$G_{\text{шa}}^{(s)}$	$R_{\text{шн}}^{(s)}$	$\text{Re } Z_{\text{кор}}^{(s)}$	$\text{Im } Z_{\text{кор}}^{(s)}$	$G_{\text{шa}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$\text{Re } Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$\text{Im } Z_{\text{кор}}^{(p)}$
$I - U$	—	$R_{\text{шa}}^{(s)}$	$G_{\text{шн}}^{(s)}$	$\text{Re } Y_{\text{кор}}^{(s)}$	$\text{Im } Y_{\text{кор}}^{(s)}$	$R_{\text{шa}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$\text{Re } Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$\text{Im } Y_{\text{кор}}^{(p)}$
$U - U^{(1)}$	$\text{Im } \Delta h$	$G_{\text{шa}}^{(s)}$	$R_{\text{шн}}^{(s)}$	$\text{Re } Z_{\text{кор}}^{(s)}$	$\text{Im } Z_{\text{кор}}^{(s)1}$	$G_{\text{шa}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$\text{Re } Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$\text{Im } Z_{\text{кор}}^{(p)}$
$I - I^{(1)}$	0	$R_{\text{шa}}^{(s)}$	$G_{\text{шн}}^{(s)}$	$\text{Re } Y_{\text{кор}}^{(s)1}$	$\text{Im } Y_{\text{кор}}^{(s)}$	$R_{\text{шa}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$\text{Re } Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$\text{Im } Y_{\text{кор}}^{(p)}$
$U - I^{(1)}$	—	$G_{\text{шa}}^{(s)}$	$R_{\text{шн}}^{(s)}$	$\text{Re } Z_{\text{кор}}^{(s)}$	$\text{Im } Z_{\text{кор}}^{(s)}$	$G_{\text{шa}}^{(p)}$	$R_{\text{шн}}^{(p)}$	$\text{Re } Z_{\text{кор}}^{(p)}$	$\text{Im } Z_{\text{кор}}^{(p)}$
$I - U^{(1)}$	$\text{Im } h_{22}$	$R_{\text{шa}}^{(s)}$	$G_{\text{шн}}^{(s)}$	$\text{Re } Y_{\text{кор}}^{(s)}$	$\text{Im } Y_{\text{кор}}^{(s)}$	$R_{\text{шa}}^{(p)}$	$G_{\text{шн}}^{(p)}$	$\text{Re } Y_{\text{кор}}^{(p)}$	$\text{Im } Y_{\text{кор}}^{(p)}$

ПРОГРАММА «ШУМ-72/2»

**расчет шумовых параметров соединений
μ-четырёхполюсников**

```
1 'BEGIN'
2 'INTEGER' S, N, T;
3 P0042 (N, T);
4 P1041 (N, T);
5 'BEGIN'
6 'ARRAY' REC21, IMC21, REC11, IMC11, REФK,
7 IMФK, ФШAS, ФШHS {1 : N};
8 'ARRAY' REP, IMP, REQ, IMQ, REV, IMV [1 : N];
9 'REAL' REФКОР, IMФКОР;
10 'REAL' P1R, P1I, P3, P4, P5R, P5I,
11 P7R, P7I, ФША, ФШH;
12 'PROCEDURE' ДЕЛ (REX, IMX,
13 REY, IMY, REZ, IMZ);
14 'VALUE' REX, IMX, REY, IMY;
15 'REAL' REX, IMX, REY, IMY, REZ, IMZ;
16 'BEGIN'
17 REZ := (REX × REY + IMX × IMY) /
18 ((REY ↑ 2 + IMY ↑ 2);
19 IMZ := (IMX × REY - REX × IMY) /
20 ((REY ↑ 2 + IMY ↑ 2);
21 'END';
22 'IF' T ≠ 1 'THEN'
23 'BEGIN'
24 P0042 (REC21, IMC21, REC11, IMC11);
25 'GO TO' K
26 'END'
27 P0042 (REP, IMP, REQ, IMQ, REV, IMV);
28 P1041 (REP, IMP, REQ, IMQ, REV, IMV);
29 ДЕЛ REP [S], IMP [S], REQ [S],
30 IMQ [S], REC21 [S], IMC21 [S];
31 ДЕЛ (REV [S], IMV [S], REQ [S],
32 IMQ [S], REC11 [S], IMC11 [S]);
33 K : P0042 (REФK, IMФK, ФШAS, ФШHS);
34 P1041 (REC21, IMC21, REC11, IMC11,
35 REФK, IMФK, ФШAS, ФШHS);
36 P1R := P1I := P3 := P4 := P5R := P5I :=
37 P7R := P7I := 0;
38 'FOR' S := 1 'STEP' 1 'UNTIL' N 'DO'
39 'BEGIN'
```

```

40 PIR:=PIR+REC21 [S];
41 P1I:=P1I+IMC21 [S];
42 P3:=P3+ΦШAS [S]×(REC21 [S]↑2+IMC21 [S]↑2);
43 P4:=P4+ΦШHHS [S]+ΦШAS [S]×((REFK [S]—
44 REC11 [S]↑2+(IMΦK [S]—IMC11 [S])↑2);
45 P5R:=P5R+ΦШAS [S]×((REC21 [S]×REFK [S]+
46 IMC21 [S]×IMΦK [S]—REC21 [S]×REC11 [S]—
47 IMC21 [S]×IMC11 [S]);
48 P5I:=P5I+ΦШAS [S]×((REC21 [S]×IMΦK [S]—
49 IMC21 [S]×REFK [S]+IMC21 [S]×REC11 [S]—
50 REC21 [S]×IMC11 [S]);
51 P7R:=P7R+REC11 [S];
52 P7I:=P7I+IMC11 [S];
53 'END'
54 ΦША:=P3×SQRT (PIR↑2+P1I↑2)↑(—2);
55 ΦШH:=P4—(P5R↑2+P5I↑2)×P3↑(—1);
56 REFKOP:=P7R+(P1R×P5R—P1I×P5I)×
57 P3↑ (—1);
58 IMΦKOP:=P7I+(P1I×P5R+
59 P1R×P5I)×P3↑(—1);
60 P1041 (REFKOP, IMΦKOP, ΦША, ΦШH);
61 'END' 'END'

```

ПРОГРАММА «ШУМ-72/3»

оптимизация коэффициента шума четырех-
полосника системы

```
1 'BEGIN'
2 'REAL' F1И, F1ИС, REC1М, REC10, F10, F1И0, F10М,
3 ФШН, ФША, ФШ1, REC1, IMC1, РЕФК, IMФК,
4 ФШ2, REC21, IMC21, REC11, IMC11;
5 P0042 (ФШН, ФША, REC1, IMC1, РЕФК, IMФК,
6 ФШ1, ФШ2, REC21, IMC21);
7 P0042 (REC11, IMC11); P1041 (REC11, IMC11);
8 P1041 (ФШН, ФША, REC1, IMC1, РЕФК, IMФК,
9 ФШ1, ФШ2, REC21, IMC21);
10 F1И:=(ФШН+ФША×((REC1+РЕФК)↑2+
11 (IMC1+IMФК)↑2))/ФШ1;
12 F1ИС:=F1И+ФШ2/ФШ1×((REC21×
13 REC1—IMC21×IMC1+REC11)↑2+
14 (IMC21×REC1+IMC1×REC21+IMC11)↑2);
15 REC1М:=SQRT (ФШН/ФША+РЕФК);
16 REC10:=SQRT (REC1М↑2+(IMC1+IMФК)↑2);
17 F10М:=2×ФША×(REC1М+РЕФК);
18 F1И0:=2×ФША×(SQRT (ФШН/ФША+РЕФК)↑2
19 +(IMC1+IMФК)↑2+РЕФК));
20 P1041 (F1И, F1ИС, REC1М, REC10, F10М, F1И0);
21 'END'
```

ПРОГРАММА «ШУМ-72/4»

расчет шумовых параметров ступенчатого
соединения μ -четырёхполосников

```
1 'BEGIN';
2 'INTEGER' S, M10, T, M, N;
3 'INTEGER' BAP; P0042 (BAP); P1041 (BAP);
4 P0042 ((MЮ, T, M, N);
5 P1041 (MЮ, T, M, N);
6 'BEGIN'
7 'ARRAY' RECMN, IMCMN, RECM, IMCMM,
8 RECNN, IMCNN, RECNM, IMCNM [1 : MЮ];
9 'ARRAY' ФШHS, ФШAS, РЕФК, ИМФК [1 : MЮ];
10 'ARRAY' REP, IMP, REQ, IMQ, REW, IMW,
11 REV, IMV, RER, IMR [1 : MЮ];
12 'REAL' ФША, ФШН, РЕФКОР, ИМФКОР;
13 'REAL' P1, P2, P3, P4, REP5, IMP5, REP6, IMP6;
14 'PROCEDURE' ДЕЛ ((REX, IMX, REY, IMY, REZ, IMZ);
15 'VALUE' REX, IMX, REY, IMY;
16 'REAL' REX, IMX, REY, IMY, REZ, IMZ;
17 'BEGIN';
18 REZ := ((REX × REY + IMX × IMY) /
19 (REY ↑ 2 + IMY ↑ 2);
20 IMZ := (IMX × REY - REX × IMY) /
21 (REY ↑ 2 + IMY ↑ 2);
22 'END';
23 'IF' T ≠ 1 'THEN'
24 'BEGIN'
25 P0042 ((RECMN, IMCMN, RECM, IMCMM,
26 RECNN, IMCNN, RECNM, IMCNM);
27 'GO TO' K
28 'END';
29 P0042 (REP, IMP, REQ, IMQ, REW, IMW,
30 REV, IMV, RER, IMR);
31 P1041 (REP, IMP, REQ, IMQ, REW, IMW,
32 REV, IMV, RER, IMR);
33 ДЕЛ ((REP [S], IMP [S], REQ [S], IMQ [S],
34 RECMN [S], IMCMN [S]);
35 ДЕЛ (REW [S], IMW [S], REQ [S], IMQ [S],
36 RECM [S], IMCMM [S]);
37 ДЕЛ (REV [S], IMV [S], REQ [S], IMQ [S],
38 RECNN [S], IMCNN [S]);
39 ДЕЛ (RER [S], IMR [S], REQ [S], IMQ [S],
40 REC [S], IMCNM [S]);
41 K; P0042 ((РЕФК, ИМФК, ФШAS, ФШHS);
42 P1041 (RECMN, IMCMN, RECM, IMCMM,
43 RECNN, IMCNN, RECNM, IMCNM,
44 РЕФК, ИМФК, ФШAS, ФШHS);
45 P1 := P2 := P3 := P4 := REP5 := IMP5 :=
46 REP6 := IMP6 := 0;
47 'FOR' S := 2 'STEP' 1 'UNTIL' MЮ 'DO'
48 'BEGIN'
```

49 $P1 := P1 + (RECMNIS - 1) \uparrow 2 + IMCMN \{S-1\} \uparrow 2) \times$
 50 $\Phi SHS \{S\};$
 51 $P2 := P2 + ((RECMN \{S-1\} \times RE\Phi K \{S\} - IMCMN \{S-1\} \times$
 52 $IM\Phi K \{S\} + RECMN \{S-1\} \uparrow 2 + (RECMN \{S-1\} \times$
 53 $IM\Phi K \{S\} + IMCMN \{S-1\} \times RE\Phi K \{S\} +$
 54 $IMCMN \{S-1\} \uparrow 2) \times \Phi SHAS \{S\};$
 55 $P3 := P3 + ((RECNN \{S-1\} \times RE\Phi K \{S\} - IMCNN \{S-1\} \times$
 56 $IM\Phi K \{S\} + RECNN \{S-1\} \uparrow 2 + (RECNN \{S-1\} \times$
 57 $IM\Phi K \{S\} + IMCNN \{S-1\} \times RE\Phi K \{S\} +$
 58 $IMCMM \{S-1\} \uparrow 2) \times \Phi SHAS \{S\};$
 59 $P4 := P4 + (RECNN \{S-1\} \uparrow 2 + IMCNN \{S-1\} \uparrow 2) \times \Phi SHS \{S\};$
 60 $REP5 := REP5 + (RECNN \{S-1\} \times RECMN \{S-1\} + IMCNN$
 61 $\{S-1\} \times$
 62 $IMCMN \{S-1\} \times \Phi SHS \{S\};$
 62 $IMP5 := IMP5 + (IMCNN \{S-1\} \times RECMN \{S-1\} - RECNN$
 63 $\{S-1\} \times$
 63 $IMCMN \{S-1\} \times \Phi SHS \{S\};$
 64 $REP6 := REP6 + ((RECMN \{S-1\} \times RE\Phi K \{S\} -$
 65 $IMCMN \{S-1\} \times IM\Phi K \{S\} + RECMN \{S-1\} \times$
 66 $(RECNN \{S-1\} \times RE\Phi K \{S\} - IMCNN \{S-1\} \times$
 67 $IM\Phi K \{S\} + RECMM \{S-1\} + (RE\Phi K \{S\}$
 68 $\times IMCMN \{S-1\} + RECMN \{S-1\} \times IM\Phi K \{S\} +$
 69 $IMCMM \{S-1\} \times (RECNN \{S-1\} \times IM\Phi K \{S\} +$
 70 $IMCNN \{S-1\} \times RE\Phi K \{S\} + IMCMM \{S-1\}))$
 71 $\times \Phi SHAS \{S\};$
 72 $IMP6 := IMP6 + ((RECMN \{S-1\} \times RE\Phi K \{S\} -$
 73 $IMCMN \{S-1\} \times IM\Phi K \{S\} + RECMN \{S-1\} \times$
 74 $(RECNN \{S-1\} \times IM\Phi K \{S\} + IMCNN \{S-1\} \times$
 75 $RE\Phi K \{S\} + IMCMM \{S-1\}) - (RE\Phi K \{S\} \times$
 76 $IMCMN \{S-1\} + RECMN \{S-1\} \times IM\Phi K \{S\}$
 77 $+ IMCMM \{S-1\}) \times (RECNN \{S-1\} \times RE\Phi K \{S\}$
 78 $- IMCNN \{S-1\} \times IM\Phi K \{S\} + RECMM \{S-1\}))$
 79 $\times \Phi SHAS \{S\};$
 80 'END';
 81 P1041 (P1, P2, P3, P4, REP5, IMP5, REP6, IMP6);
 82 $\Phi SHAS := \Phi SHAS \{1\} + P1 + P2;$
 83 $\Phi SHH := \Phi SHS \{1\} + (RE\Phi K \{1\} \uparrow 2 +$
 84 $IM\Phi K \{1\} \uparrow 2) \times \Phi SHAS \{1\} + P3 +$
 85 $P4 - ((RE\Phi K \{1\} \times \Phi SHAS \{1\} +$
 86 $REP5 + REP6) \uparrow 2 + (IM\Phi K \{1\} \times$
 87 $\Phi SHAS \{1\} + IMP5 + IMP6) \uparrow 2) \times$
 88 $(\Phi SHAS \{1\} + P2 + P1) \uparrow (-1);$
 89 $RE\Phi KOP := (RE\Phi K \{1\} \times \Phi SHAS \{1\} + REP6 +$
 90 $REP5) \times (\Phi SHAS \{1\} + P2 + P1) \uparrow (-1);$
 91 $IM\Phi KOP := (IM\Phi K \{1\} \times \Phi SHAS \{1\} +$
 92 $IMP6 + IMP5) \times (\Phi SHAS \{1\} + P2 +$
 93 $P1) \uparrow (-1);$
 94 P1041 (RE\Phi KOP, IM\Phi KOP, $\Phi SHAS$, ΦSHH);
 95 'END'
 96 'END'

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. Г. Проблемы создания микроэлектронной аппаратуры. «Микроэлектроника», 1967, вып. 1.
2. Артым А. Д. Усилители с обратной связью. Л., «Энергия», 1969, 248 с.
3. Белецкий А. Ф. Основы теории линейных электрических цепей. М., «Связь», 1967. 607 с.
4. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. «ИЛ», М., 1948. 641 с.
5. Борисов А. И. Определение основных параметров многоканальных усилителей на полупроводниковых триодах для кабельных магистралей. «Электросвязь», 1960, № 2.
6. Будинский И. Усилители низкой частоты на транзисторах. М., Связьиздат, 1963. 319 с.
7. Ван-дер-Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках. «ИЛ», М., 1961. 232 с.
8. Гуткин Л. С., Лебедев В. Л., Сифоров В. И. Радиоприемные устройства. Ч. I. М., «Советское радио», 1961. 703 с.
9. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., «Советское радио», 1971. 626 с.
10. Дементьев Е. П. Элементы общей теории и расчета шумящих линейных цепей. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 210 с.
11. Ефимов И. Е. Современная микроэлектроника. М., «Советское радио», 1973.
12. Давыдов Г. Б. Основы теории и расчета фазокорректирующих цепей. М., Связьиздат, 1938. 293 с.
13. Егоров К. П. Основы многоканальной связи. М., «Связь», 1962. 416 с.
14. Зелях Э. В. Новая теория автономного четырехполюсника и ее применение к усилителю с распределенным усилением. — «Радиотехника», 1960, т. 15, № 8.
15. Зелях Э. В. Основы общей теории линейных электрических схем. Изд. АН СССР, 1951. 335 с.
16. Знаменский А. Е., Теплюк И. Н. Активные RC-фильтры. М., «Связь», 1970. 280 с.
17. Коган С. С. Теория и расчет фильтров для установок дальней связи. М., Связьиздат, 1950. 178 с.
18. Кузьмин А. Д. Измерение коэффициента шума приемно-усилительных устройств. М.—Л., Госэнергоиздат, 1965. 64 с.
19. Косминский О. Ф. Расчет четырехполюсных переменных выравнивателей. НТС, ГСНИИ, № 3, 1958.
20. Листов В. Н. Элементарная теория фильтров. М., Трансжелдориздат, 1963. 170 с.
21. Ланнэ А. А. Оптимальный синтез линейных электрических цепей. М., «Связь», 1969.

22. Лурье Б. Я. Проектирование транзисторных усилителей с глубокой обратной связью. М., «Связь», 1965. 150 с.
23. Меркулов А. Г. Переменные выравниватели. М., Связьиздат, 1960. 67 с.
24. Машинный расчет интегральных схем. М., «Мир», 1971. 407 с.
25. Новиков В. В. Теоретические основы микроэлектроники. М., «Высшая школа», 1972. 352 с.
26. Потрясай В. Ф., Рыжов А. С., Сутягин В. Я. Шумы транзисторов. — Сб. «Полупроводниковые приборы и их применение». М., «Советское радио», 1960, вып. 5.
27. Полякова Л. Н. Синтез входных и выходных цепей широкополосных усилителей. М., «Связь», 1966. 55 с.
28. Сифоров В. И. Радиоприемники сверхвысоких частот. М., Воениздат, 1957. 636 с.
29. Сигорский В. П., Петренко А. И. Алгоритмы анализа электронных схем. Киев, «Техника», 1970. 394 с.
30. Славский Г. Н. Активные RLC - и RC -фильтры и избирательные усилители. М., «Связь», 1966. 216 с.
31. Сельверстов Г. Г. Общие методы анализа шумовых линейных электрических цепей. — «Вопросы радиоэлектроники», серия XI, вып. 1, 1966.
32. Стафеев В. И. Некоторые проблемы микроэлектроники. — Сб. ст. «Микроэлектроника», под ред. Ф. Л. Лукина. М., «Советское радио», 1967, вып. 1.
33. Суходоев И. В. Перспективы микроминиатюризации устройств аналоговой многоканальной связи. — Сб. «Полупроводниковые приборы в технике электросвязи». Под ред. И. Ф. Николаевского. М., «Связь», 1969, вып. 4.
34. Суходоев И. В. Шумовые параметры транзисторов. М., «Связь», 1967. 74 с.
35. Суходоев И. В. Шумы электрических цепей. (Теория). М., «Связь», 1975.
36. Суходоев И. В. Расчет цепей с операционными усилителями. — «Вопросы радиоэлектроники», 1972, серия XI, вып. 1.
37. Стандарты института радиотехников по методам измерения шума в линейных четырехполюсниках, № 1, т. 48, 1960.
38. Собенин Я. А., Кобызева Н. Н. Расчет амплитудных выравнивателей. М., «Связь», 1969.
39. Термен Ф., Петтит Д. Измерительная техника в электронике. М., «ИЛ», 1955. 604 с.
40. Терпугов Н. В. Метод определения шумовых параметров четырехполюсников. — «Радиотехника», 1962, том 17, № 11.
41. Тегерич Н. М. Генераторы шума и измерение шумовых характеристик. М., «Энергия», 1968. 215 с.
42. Трохименко Я. К. Метод обобщенных чисел и анализ линейных цепей. М., «Советское радио», 1972. 212 с.
43. Турин В. Л., Листов В. Н., Высоцкий А. В. Дальняя связь. М., Трансжелдориздат, 1957. 411 с.
44. Чаповский М. З. Улучшение качественных показателей транзисторных усилителей. М., «Связь», 1968. 232 с.
45. Ши Р. Ф. Расчет транзисторных цепей. М., «Энергия», 1964. 263 с.

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
- δ — индекс, действующее значение
- c — индекс, сигнал, собственная (характеристическая), постоянная величина
- C — емкость
- e — комплексное задающее напряжение
- \bar{e} — среднеквадратическое значение задающего напряжения
- $|e_{ш}|^2$ — 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
- i — комплексный ток
- I — постоянный ток, среднеквадратическое значение тока
- $|I_{ш}|^2$ — средний квадрат шумового тока
- i — комплексный задающий ток, среднеквадратическое значение задающего тока
- $|i_{ш}|^2$ — средний квадрат задающего шумового тока
- μ — индекс, оконечный элемент в соединении
- L — индуктивность
- n — индекс, номинальный, независимый
- (p) — индекс, результирующее значение
- s — индекс, промежуточный элемент соединения
- R — активное сопротивление
- $R_{ш}$ — эквивалентное сопротивление шума
- \dot{U} — комплексное напряжение
- U — постоянное напряжение, среднеквадратическое значение напряжения
- $|U_{ш}|^2$ — 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_∞ — сопротивление холостого хода
- z — параметр четырехполюсника
- Δ — определитель системы уравнений
- Δf — ширина полосы частот (спектра)
- 1, 2 и 0 — индексы, прямая, обратная и нулевая последовательность

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. <i>Определение шумовых параметров</i>	5
1.1. Способы определения	5
1.2. Метод графических построений	5
1.3. Метод двух измерений	7
1.4. Метод экстремальных величин	9
1.5. Измерительное оборудование	11
1.6. Шумовые параметры транзисторов	13
Глава 2. <i>Расчет шумов пассивных цепей</i>	20
2.1. Пассивные цепи	20
2.2. Расчет шумов LC-фильтров	21
2.3. Расчет шумов RLC-корректоров	35
2.4. Расчет шумов RC-цепей	37
Глава 3. <i>Расчет шумов активных цепей</i>	45
3.1. Расчет шумов транзисторных RC-цепей	45
3.2. Расчет шумов цепей с операционными усилителями	59
3.3. Расчет шумов цепей с электронными лампами	68
3.4. Расчет шумов цепей распределенной структуры	68
Глава 4. <i>Порядок расчета шумов многокаскадных усилителей</i>	80
4.1. Исходные положения	80
4.2. Усилители без общей ООС	82
4.3. Усилители с ООС последовательного типа	90
4.4. Усилители с ООС параллельного типа	93
4.5. Усилители с ООС последовательно-параллельного типа	97
4.6. Усилители с ООС параллельно-последовательного типа	99
Глава 5. <i>Программный расчет шумящих цепей</i>	104
5.1. Направления программирования	104
5.2. Программа расчета шумов четырехполюсника (системы)	106
5.3. Программа расчета шумов сложных соединений	108
Список литературы	117
Основные обозначения	119

51 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СВЯЗЬ»